

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
Приладобудівний факультет**

**Кафедра приладів і систем орієнтації і навігації**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Надія БУРАУ

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Дипломний проєкт**

**на здобуття ступеня бакалавра**

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно - інтегровані технології  
та системи навігації і керування»**

**спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»**

**на тему: «Проектування 3-D принтера»**

Виконав :

студент III курсу, групи ПГ-п71

Володимир СОРОКОЛАТ \_\_\_\_\_

Керівник:

Доц., к.т.н., доц.,

Сергій ЦИБУЛЬНИК \_\_\_\_\_

Рецензент:

асистент каф. ІВТ, к.т.н.,

Віктор ІВАСЕНКО \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2020 року

## ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/П	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДП ПГ-п7110.1730.000 ПЗ	Пояснювальна записка	53	
3	A3	ДП ПГ-п7110.1730.001 ТК		1	
4	A3	ДП ПГ-п7110.1730.002 ТК		1	
5	A3	ДП ПГ-п7110.1730.003 ТК		1	
6	A3	ДП ПГ-п7110.1730.004 ТК		1	
7	A1	ДП Тривимірна модель		1	
8	A1	ДП Принципова схема		1	
9	A1	ДП Технології 3D друку		1	

				ДП ПГ-п7110.1730.00		
	ПІБ	Підп.	Дата	Відомість дипломного проєкту		
Розробн.	Сороколат В.В.					
Керівн.	Цибульник С.О.					
Консульт.						
Н/контр.						
Зав.каф.						
					Лист	Листів
					1	1
				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ПСОН Гр. ПГ-п71		

**Пояснювальна записка**  
**до дипломного проєкту**  
**на тему: «Проектування 3-D принтера»**

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Приладобудівний факультет**

**Кафедра приладів і систем орієнтації і навігації**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані технології та системи навігації і керування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Н.І. Бурау

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломну роботу студенту**

**Сороколату Володимиру Валерійовичу**

1. Тема роботи «Проектування 3-D принтера», керівник роботи Цибульник Сергій Олексійович, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом роботи 08.06.2020р.

3. Вихідні дані до роботи

4. Зміст роботи:

1. Принцип роботи 3D принтерів.
2. Технології 3D друку.
3. Програми для 3D моделювання.
4. Основні компоненти 3D принтера.
5. Програмне забезпечення 3D принтера

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)  
Деталювання – А1, електрична/принципова схема – А1, тривимірна модель складальної одиниці – А1, технології 3D друку – А1.

6. Дата видачі завдання 02.04.2020р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Принцип роботи 3D принтерів	13.04.2020	
2	Технології 3D друку	20.04.2020	
3	Програми для 3D моделювання	04.05.2020	
4	Основні компоненти 3D принтера	11.05.2020	
5	Програмне забезпечення 3D принтера	25.05.2020	
6	Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	08.06.2020	

Студент

В.В. Сороколат

Керівник

С.О. Цибульник

## ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯДОВА ЧАСТИНА	8
1.1 3D друк. Історія розвитку	8
1.2 Принцип роботи 3D принтерів	9
1.3 Область застосування 3D принтерів	10
1.4 Технології 3D друку	14
1.5 Категорії 3D принтерів	21
1.6 Програми 3D моделювання	23
РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	27
2.1 Основні компоненти 3D принтера та їх принцип дії	27
2.2 Принципова схема та підключення електричних складових 3D принтера	34
2.3 Програмне забезпечення 3D принтера	36
ВИСНОВКИ	45
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	46
ДОДАТКИ	47
Додаток А	47

## ВСТУП

В наш час розвинуті комп'ютерні технології потребують створення нових методів та засобів їх використання. Одна з таких це 3D друк, база якого полягає в друкуванні об'ємних предметів при невеликій кількості витрат. За допомогою такого способу, друкування має сильні перспективи розвитку та стає більш масовим. Напевно без такої технології уявити життя у майбутньому буде неможливо. Її будуть використовувати для швидкого відновлення будівель після природніх катаклізмів. Можливо, що потреба у донорстві відійде, бо необхідні органи для людей можна буде надрукувати на 3D принтері у найкоротші терміни. 3D друк вдосконалить виробництво деталей для автомобілів, побутової техніки, які можна буде виготовляти з точністю до найменших елементів, які одразу будуть готовими до експлуатації.

Пристрій, що створює фізичний об'єкт на базі віртуальної 3D моделі називається 3D принтер. Саме такий пристрій буде описано в даному дипломному проекті. 3D принтер, як і звичайний принтер підключається до ПК і за допомогою спеціальної програми створює задані об'єкти [1].

Завданням дипломного проекту є конструювання працездатного 3D-принтеру, який буде адекватно виконувати задані функції, а також інтегрування програми, яка безпосередньо здійснює управління виконанням операцій.

## РОЗДІЛ 1. ОГЛЯДОВА ЧАСТИНА

### 1.1 3D друк. Історія розвитку

Невід'ємною частиною життя звичайних людей з кожним днем стають сучасні технології. Незамінними речами, що суттєво полегшують нам процеси спілкування та навчання стають ноутбуки, смартфони, мінікомп'ютери та найрізноманітніша комп'ютерна техніка. Можливості кожної людини можна розширити за допомогою сучасних технологій, що вирішують безліч завдань. Це означає, що настигла ера комп'ютерних технологій. Вони дуже стрімко розвиваються в наш час. Люди знайшли безліч різних способів використання 3D принтерів, хоч пройшло мало часу з дати їх створення.

Американська SLA-установка стала найпершим пристроєм, що створює 3D прототипи. Розробив і запатентував її в 1986 році Чарльз Халл. Використовуючи стереолітографію вона визначила, як функціонує 3D принтер: пошарове нарощування об'єктів.

Одразу після створення Халлом фірми 3D Systems, нею був виготовлений перший пристрій для об'ємного друку, що називається Stereolithography Apparatus. SLA-250, яку розробили у 1988 році стала першою моделлю цього апарату, що досягла широкого поширення[2].

Метод наплавлення у 1990 році став новим способом отримання об'ємних «друкованих відтисків». Продовживши розвиток 3D друку його розробниками стали засновник компанії Stratasys Скотт Крамп зі своєю дружиною. Після цього поняття «струменевий 3D принтер» і «лазерний 3D принтер» стали активно використовуватися.

Після створення компанії Solidscapе у 1993 році почався сучасний історичний етап розвитку 3D друку. Струменеві принтери, що вона випускала почали передувати тривимірним. Модифікований струменевий принтер був створений двома студентами у 1995 році. Об'ємні зображення він створював в спеціальній ємності, а не на папері. Саме тоді з'явився перший 3D принтер та поняття «3D друк». Цей метод запатентували і почали використовувати у компаніях ExOne та Z Corporation.

Поява технології PolyJet, що використовувала рідкий фотополімерний пластик стала наступним кроком в історії 3D принтерів. В такому методі друку головка «малює» шар фотополімеру, що одразу засвічується лампою. Метод став виграшним за декількома параметрами: його висока точність дала можливість виготовляти не просто моделі, а готові до застосування деталі, ціна яких значно



нижче[2].

Порівняно з першими 3D принтерами, їх сучасні аналоги стали більш досконалішими. Їх межі застосування дуже розширились.

Фахівці з дослідницького медичного інституту Файнштейна, за допомогою 3D принтера MakerBot створили, так звану, підкладку, яка складається з біопластика та полістиролу. Після цього на неї нанесли живі клітини за допомогою 3D друку. Вчені створили суміш колагену та клітин хрящової тканини. Вдало перенісши таку операцію клітини створили фрагмент трахеї, яка була придатна для трансплантації.

Зрозуміло, без модернізації принтера це все було б неможливо здійснити. В блок друкування пристрою вмонтували шприци з біочорнилами та клітинами. Принтер друкував живими клітинами, хоч і нагадував «пластиковий» друк. Приблизно рік було віднесено для створення ділянки трахеї, але в майбутньому органи можна буде друкувати значно швидше.

За думкою співробітника данного інституту Тодда Голдштейна цю технологію можна буде використовувати для друку таких органів, як ніс чи вухо та подальшої їх трансплантації. Фахівець вважає, що одна з головних проблем розробленого методу полягає в припливі крові, який важко налаштувати[2].

З кожним днем 3D друк стає ще більш популярним. Його можна побачити у багатьох видах галузей. Галузь будівництва теж не обійшла стороною дану технологію. Першими хто спробував надрукувати будівлі стали китайці. Спеціалізований 3D принтер може виготовляти деталі, що можуть досягати висоти в 6,4 м та ширини 9,75 м. Друкуючим матеріалом є суміш, що складається з будівельних відходів: сталу, цементу та скла. Переробка будівельних відходів стала великою перевагою даного 3D друку. В цілому будівництво майбутнього стане більш екологічно чистим.

## **1.2 Принцип роботи 3D принтерів**

Загальновідомо, як виходять об'ємні об'єкти методом лиття або механічної обробки заготовки, форма якої найбільш близька до кінцевого результату. Цей принцип, що сформулював Мікеланджело, як відсікання від каменю всього зайвого, використовують для створення скульптур. Кардинально відрізняючись від вказаних вище в тривимірному друці використовують адитивний (від англійського add – “додавати”) спосіб формування фігури. В ньому відбувається пошарове формування об'єкта методом послідовного нанесення порцій матеріалу.

Його вирощують крок за кроком до тих пір, поки створюване тіло не набуде належну конфігурацію [3].

Згідно заданій конфігурації шару виконується нанесення матеріалу шляхом позиціонування друкуючої головки в системі двох координат X та Y. Вирощування наступного рівня деталі починається після переміщення робочої платформи на крок уздовж осі Z.

Створення комп'ютерної моделі майбутнього об'єкта є першим етапом підготовки до друку. Це можна зробити двома способами: шляхом 3d сканування об'єкта, який потрібно скопіювати або використовуючи тривимірний графічний редактор або CAD-системи (3D Studio Max, AutoCAD, SolidWorks, та інші). Після розбивки моделі на шари за допомогою програмного забезпечення принтера відбувається генерація набору команд, які визначають послідовність нанесення матеріалу при друку.

За аналогією з двовимірними периферійними пристроями, обладнання, що реалізує адитивний метод створення тіл, характеризується дозволом по трьох осях в просторі. До цих параметрів належать точність позиціонування друкувального елемента та висота шару. Від величини області друку залежить максимально можливий розмір вирощуваного тіла, що є дуже важливою технічною характеристикою 3D принтера[3].

Як матеріали для тривимірних об'єктів в адитивному виробництві можуть використовуватися металеві сплави, мінеральні суміші, папір, фотополімери та різні види пластиків. Деякі 3D принтери можуть працювати одразу з декількома матеріалами, що відрізняються за властивостями чи кольором. Також існує метод, який шляхом підмішування в процесі друку барвника до прозорого полімеру дозволяє отримати об'єкти, які характеризуються різноманітністю відтінків,.

### **1.3 Область застосування 3D принтерів**

Входячи в наше життя все міцніше і міцніше 3D друк перетворився з дорогої та вузьконаправленої послуги в незамінного помічника для професіоналів різноманітних сфер діяльності.

Експерименти в будівництві, архітектурі, дрібносерійному виробництві, медицині, освіті, ювелірній справі, поліграфії, виготовлення рекламної та сувенірної продукції, дозволяються завдяки доступності 3D друку[4].

Широкого застосування 3D друк знайшов у виготовленні архітектурних макетів споруд, будівель, мікрорайонів, котеджних селищ зі своєю

інфраструктурою: дорогами, вуличним освітленням, деревами.

За допомогою дешевого гіпсового композиту можна друкувати тривимірні архітектурні макети, що мають низьку собівартість готових моделей. За даними на нинішній день є 390 тисяч відтінків палітри СМΥΚ для 3D друку, які дозволяють втілити в життя будь-яку з кольірних фантазій архітектора. Чорно-білі моделі 3D ZPrinter 150 і 350 та кольорові моделі 3D ZPrinter 250, 450, 650, 850 найчастіше використовують для тривимірного друку архітектурних прототипів та моделей.

Систему 3D друку для роботи з великогабаритними об'єктами була створена інженерами з університету Південної Каліфорнії. Пристрій працює за методом будівельного крана, що будує стіни з шарів бетону. За допомогою такого 3D принтеру двоповерховий будинок можна побудувати лише за 20 годин. Будівельникам залишаються тільки операції зі встановлення вікон, дверей та внутрішня обробка приміщення.

Може бути, що через декілька десятків років з'являться цілі поселення з чудовими комфортними будинками, побудованими за технологією 3D друку.

Професійні 3D принтери поступово відвойовують свої позиції в сфері дрібносерійного виробництва. Дана технологія друку дозволяє виготовити ексклюзивні вироби, наприклад предмети мистецтва, фігурки персонажів для учасників рольових інтернет-ігор, прототипи і концептуальні моделі майбутніх споживчих товарів або їх конструктивні деталі. Ці моделі використовують як для презентацій нових товарів, так і в експериментальних цілях[4].

Використання 3D принтерів для функціонального тестування - це один із сучасних методів інноваційних розробок. У більшості випадків це необхідність протестувати новий механізм в зборі, але виготовити окремі компоненти в одному екземплярі занадто довго, дорого і дуже проблематично. На допомогу приходять 3D принтери з різним ступенем деталізації моделей.

Використання 3D принтерів в медицині дозволяє врятувати людські життя. За допомогою них можна створити точну копію людського скелета для відпрацювання прийомів, що гарантують проведення успішної операції. Все частіше 3D принтери використовують в протезуванні та стоматології, так як тривимірний друк дозволяє отримати протези і коронки значно швидше класичною технологією виробництва.

Медичні тривимірні моделі можуть бути виготовлені з цілого ряду матеріалів, включаючи живі органічні клітини. Вибір того чи іншого матеріалу для медичного прототипування залежить від цілей і завдань, що стоять перед медиками, і проблем, пов'язаних зі здоров'ям пацієнта [4].

Використання 3D принтерів в освіті дозволяють створити наочні посібники, що відмінно підходять для будь-яких класних кімнат освітніх установ,

від дитячих садків до вузів.

Сучасні 3D принтери мають покращену надійність. Не пред'являючи особливих вимог до утилізації, не виділяючи під час друку шкідливих для здоров'я продуктів, не містячи ріжучих і бритвених матеріалів, не маючи лазерів, вони відмінно підходять для класних кімнат.

Якщо оснастити освітні установи конструкторських або дизайнерських спеціальностей 3D принтерами, то це посприє швидшому засвоєнню знань учнями і студентами та підвищенню ефективності освітнього процесу.

Використання 3D принтерів у сфері виробництва одягу дозволяють виробляти моделі для високої моди. Нещодавно була представлена колекція «Напруга» голландського модельєра Айріс Ван Херпен, модельний ряд якої був створений за допомогою 3D друку. Цю колекцію було представлено на Тижні високої моди в Парижі.

Використовуючи технологію 3D друку можна при виготовленні одного предмета одягу використовувати одразу кілька різних матеріалів. Таким способом можна усунути проблеми, пов'язані з еластичністю та міцністю речей, що виготовляються.

Одяг, який створили 3D принтером на даний момент можна побачити тільки на показах мод. Без сумнівів впровадження таких виробів в масове виробництво залишається питанням часу. Скоріше за все в найближчому майбутньому ми зможемо надрукувати собі нову сорочку, вечірнє плаття або шубу, навіть не виходячи з дому[4].

Завдяки старанням шведських студентів в 2011 році з'явилася перша пара взуття, яку надрукували на 3D принтері. Сьогодні тривимірне взуття, надруковане на принтерах, красується на провідних подіумах усього світу. Істотною перевагою такого взуття є точний облік індивідуальних особливостей її власника, включаючи форму і розмір стопи.

Відрізняючись від традиційного, зовнішній вигляд 3D взуття дозволить підкреслити свою індивідуальність креативних молодих людей та буде користуватися серед них шаленим попитом. За допомогою 3D друку є можливість друкувати не тільки жіночу, але й чоловіче взуття. В своїй дебютній колекції студент Лондонського коледжу моди Росс Бербер представив п'ять пар взуття, які були надруковані на принтері.

Для виготовлення 3D взуття використовують поліуретан, гуму і пластик. Вартість такого взуття поки занадто висока, щоб налагодити її масове виробництво.

Як відомо, при виготовленні ювелірних виробів самої трудомісткою процедурою є створення воскових прототипів, яке вимагає колосальних витрат часу. З появою 3D принтерів у ювелірів з'явилася можливість швидко вирощувати

воскові моделі прикрас, попередньо розроблені в спеціальній програмі.

Для створення прототипів ювелірних прикрас з використанням 3D принтера використовується спеціальний матеріал, за своїм складом схожий на ювелірний віск. Для друку прототипів ювелірних прикрас можна використовувати такі 3D принтери: Soldscape T76, Eden 260V і 500V, Objet260 Connex і ін.

Тривимірні принтери дозволяють виготовляти пробні макети упаковки, флаконів і пляшок оригінальної форми. Прототипи можуть бути кольоровими, з включенням всіх елементів дизайну, в т.ч. етикеток, штрих-кодів, фірмових знаків. Готові моделі упаковки можуть бути продемонстровані замовнику перед запуском в масове виробництво. Перевага 3D прототипів в наявності: замовник може потримати упаковку в руках, оцінити її фактуру, текстуру, кольорове оформлення і деякі інші характеристики.

Для виготовлення пластикових упаковок в даний час використовують такі 3D принтери: Dimension uPrint, uPrint +, Elite, SST 1200ES; Fortus 400mc і 900mc. Для виготовлення напівпрозорої і деталізованої упаковки використовуються принтери: Objet 24 і 30; Eden 250, 260V, 350, 500V; Objet 260 Connex, Connex 350 і 500. Для друку кольоровий упаковки найкраще підійдуть принтери ZPrinter 250, 450, 650 і 850.

Використання 3D принтерів для створення унікальних сувенірів та іграшок вже ні у кого не викликає подиву. Тепер можна з легкістю отримати готовий повноколірний прототип перед запуском виробу в масове виробництво. Аналіз прототипу дозволяє вивчити форму майбутнього виробу, його текстуру, колір та розмір. Найчастіше сувенірні вироби друкують з гіпсових матеріалів, додатково оброблених для збільшення міцності готового виробу. 3D принтери друкують сувеніри з різною кольоровою гамою, аж до повнокольорової текстури в 390000 відтінків [4].

Використовуючи 3D принтери є можливість створити об'ємні кольорові карти, які точно вказують рівні залягання різних порід чи відображають ландшафт місцевості.

Скоріше за все в найближчий час 3D принтер стане для нас таким же невід'ємним атрибутом нашого побуту, як телевізор, мікрохвильова піч або холодильник, і ми будемо з подивом згадувати той час, коли люди не вміли друкувати одяг, посуд, взуття та інші корисні предмети в домашніх умовах, а купували це все в магазині.

## 1.4 Технології 3D друку

3D друк може здійснюватися різними способами і з використанням різних матеріалів, але в основі будь-якого з них лежить принцип пошарового створення (вирощування) твердого об'єкта.

Стереолітографія (StereoLithography Apparatus, SLA). Це технологія (рисунок 1) вихідним продуктом, якої є рідкий фотополімер, в який доданий спеціальний реагент-затверджувач, і ця суміш нагадує всім відому епоксидну смолу, тільки в звичайному стані вона залишається рідкою, а полімеризується і стає твердою під впливом ультрафіолетового лазера [5].

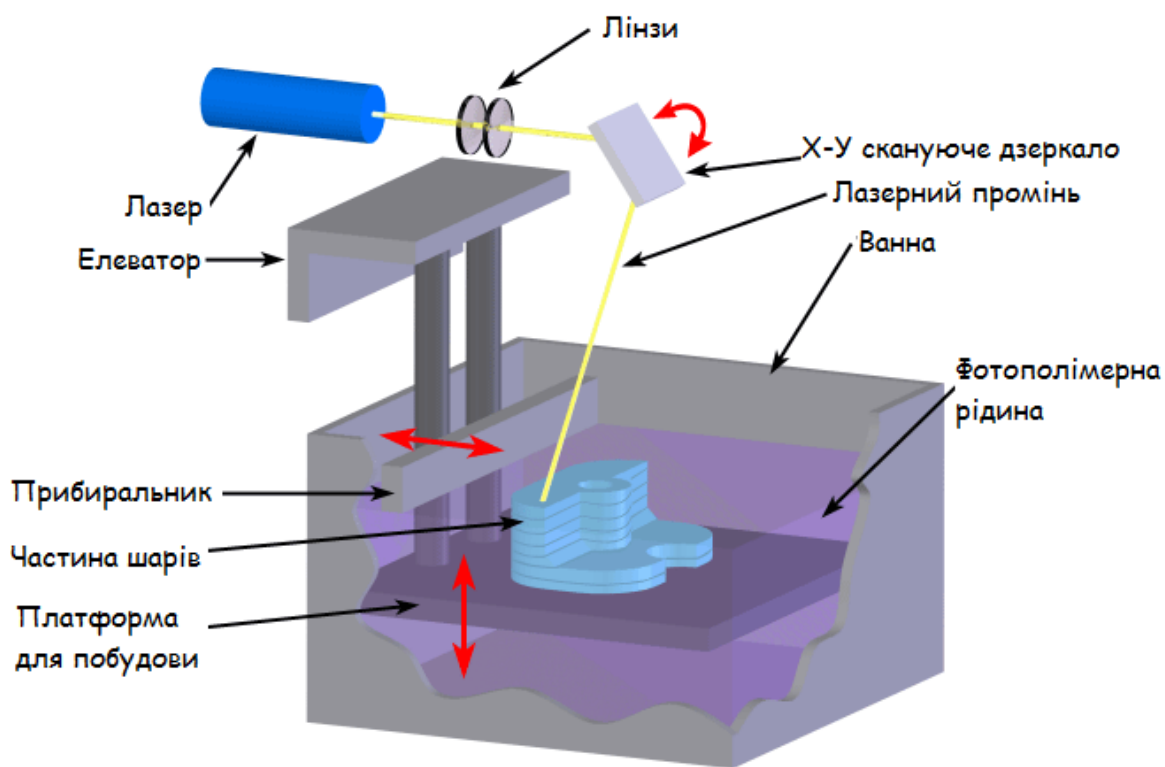


Рисунок 1 – Технологія стереолітографія

Природно, лазер не може відразу створити всю модель в товщі полімеру, і мова може йти тільки про послідовній побудові тонкими шарами. Тому використовується рухома підкладка з отворами, яка за допомогою мікроліфта-елеватора занурюється в фотополімер на товщину одного шару, потім лазерний промінь засвічує області, що підлягають затвердінню, підкладка занурюється ще на товщину одного шару, знову працює лазер, і так далі.

Не обходиться і без істотних складнощів. По-перше, вимоги до самого

фотополімеру досить суперечливі: якщо він буде густим, то його легше полімеризувати, але складніше забезпечити рівну поверхню після кожного кроку занурення; доводиться використовувати спеціальну лінійку, яка на кожному кроці проходить по поверхні рідини і вирівнює її. Велика кількість затверджувача при фіксованій потужності лазера дозволить зменшити необхідний час впливу, проте неминуче фонове засвічення «псує» навколишній обсяг полімеру і скорочує можливий термін його використання.

По-друге, повна полімеризація кожного шару зайняла б чимало часу, тому засвічення проводиться до рівня, при якому шар набуває лише мінімально необхідну міцність, а згодом готову модель, попередньо промивши від залишків рідкого полімеру, доводиться опромінювати потужним джерелом в спеціальній камері, щоб полімеризація досягла 100%.

Вибіркове лазерне спікання (Selective Laser Sintering, SLS). Цей метод (рисунок 2) з'явився приблизно в той же час, що і SLA, і навіть має з ним багато спільного, тільки замість рідини використовується порошок з діаметром частинок 50-100 мкм, тонкими рівномірними шарами розподіляється в горизонтальній площині, а потім лазерний промінь спікає ділянки, що підлягають затвердінню на даному шарі моделі [5].

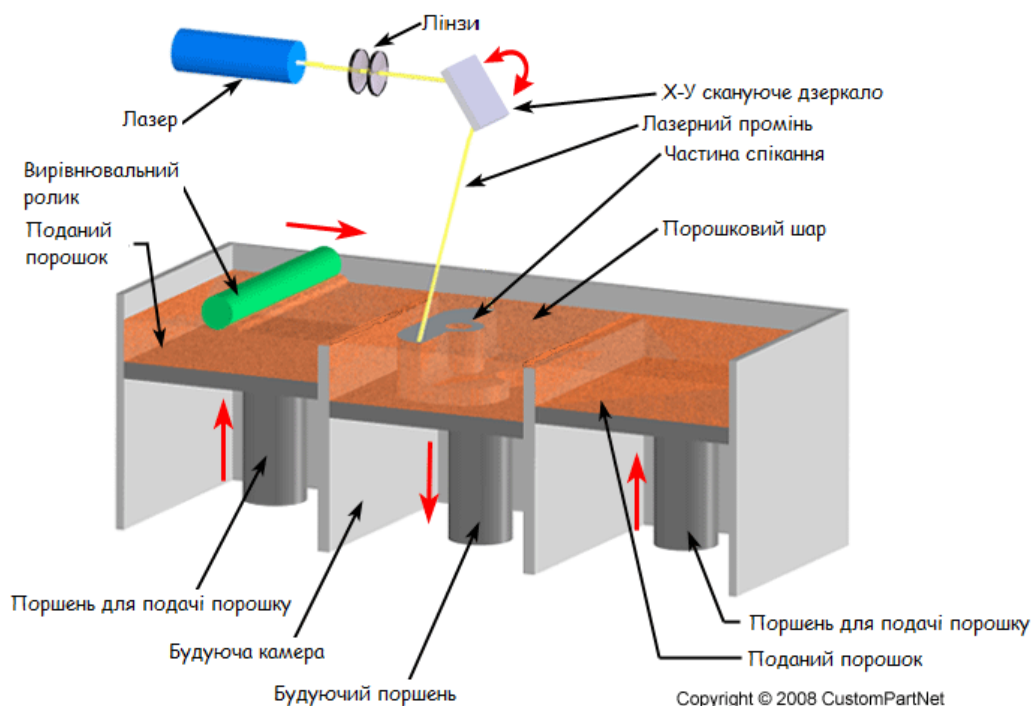


Рисунок 2 – Технологія вибіркового лазерного спікання

Вихідні матеріали можуть бути самі різні: метал, пластик, кераміка, скло, ливарний віск. Порошок наноситься і розрівнюється по поверхні робочого столу

спеціальним валиком, який при зворотному проході видаляє надлишки порошку. Потім працює потужний лазер, спікаються частки один з одним і з попереднім шаром, після чого стіл опускається на величину, рівну висоті одного шару. Для зниження потужності лазера, необхідної для спікання, порошок в робочій камері попередньо нагрівається майже до температури плавлення, а сам лазер працює в імпульсному режимі, оскільки для спікання важливіше пікова потужність, а не тривалість впливу.

Частинки можуть плавитися повністю або частково (по поверхні). Не запечений порошок, що залишається навколо отверділих шарів, служить підтримкою при створенні нависаючих елементів моделі, тому немає необхідності в формуванні спеціальних підтримуючих структур. Але цей порошок по закінченні процесу необхідно видалити як з камери, особливо якщо наступна модель буде створюватися з іншого матеріалу, так і з порожнин вже виготовленої моделі, що можна зробити лише після її повного остигання.

Часто потрібна фінішна обробка - наприклад, полірування, оскільки поверхня може виходити шорсткою. Крім того, матеріал може використовуватися не тільки чистий, але і в суміші з полімером або у вигляді частинок, покритих полімером, залишки якого потрібно видалити шляхом випалювання в спеціальній печі.

Оскільки мова йде про високі температури, необхідних для спікання, процес відбувається в азотному середовищі з малим вмістом кисню. При роботі з металами це ще і запобігає окисленню.

Серійно випускаються установки SLS дозволяють працювати з досить великими об'єктами, до 55 · 55 · 75 см.

Варіантами технології є:

- селективне лазерне плавлення (Selective Laser Melting, SLM), яке використовується для роботи з чистими металами без домішок полімеру і дозволяє створити готовий зразок за один етап;

- електронно-променеве плавлення (Electron Beam Melting, EBM) з використанням електронного променя замість лазера; ця технологія вимагає роботи у вакуумній камері, але дозволяє використовувати навіть такі метали, як титан.

Зустрічаються і такі назви, як Direct Metal Fabrication (DMF), а також Direct Manufacturing.

Метод багатоструменевого моделювання (Multi Jet Modeling, MJM). Принтери, засновані на даній технології (рисунк 3), випускаються компанією 3D Systems. У зв'язку з патентними обмеженнями є і назви, які використовуються іншими виробниками принтерів: PolyJet (Photopolymer Jetting, компанія Stratasys), DODJet (Drop-On-Demand Jet, компанія Solidscape). Звичайно, відмінності не



тільки в назвах, але базові принципи схожі [5].

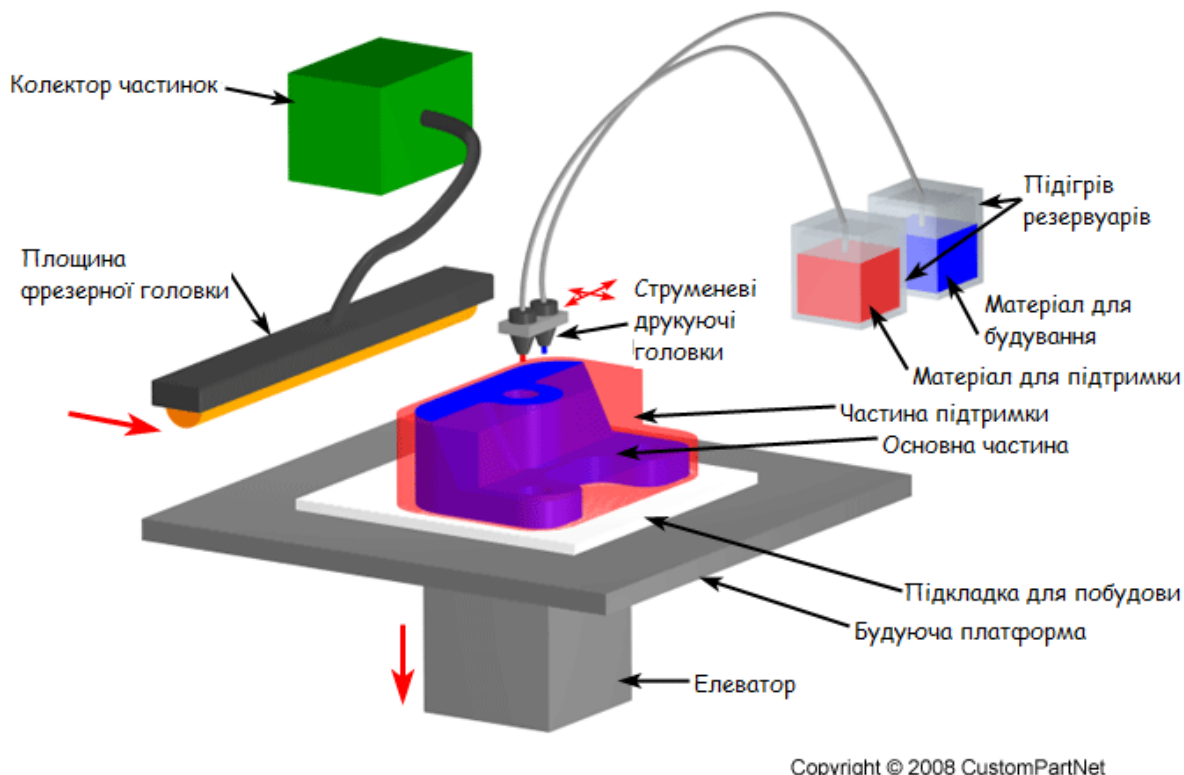


Рисунок 3 – Технологія багатоструменевого друку

Процес дуже нагадує звичайний струменевий друк: матеріал подається через сопла малого діаметра, розташовані рядами на друкуючій голівці. Кількість сопел може бути від декількох штук до декількох сотень. Звичайно, матеріал не є рідким при кімнатній температурі, спочатку він нагрівається до температури плавлення (як правило, не дуже високою), потім подається в голівку, наноситься пошарово і застигає. Шари формуються переміщенням голівки в горизонтальній площині, а вертикальне зміщення при переході до наступного шару, як і в попередніх випадках, забезпечується опусканням робочого столу. У варіанті DODJet додається етап обробки шару фрезерної голівкою.

Як матеріал для MJM-принтерів використовують пластики, фотополімери, спеціальний віск, а також матеріали для медичних імплантів, зубних зліпків і протезів. Можлива й комбінація різних матеріалів: на відміну від попередніх двох технологій, які виступають під великим кутом елементи моделей або горизонтальні перемички, щоб уникнути провисань вимагають застосування підтримуючих структур, які при фінішній обробці доводиться видаляти. Щоб не робити це вручну, можна застосувати для підтримок матеріал з меншою

температурою плавлення, ніж для власне моделі, і потім видалити його розплавленням в спеціальній печі. Інший варіант - використання для підтримок матеріалу, який видаляється розчиненням в спеціалізованому розчині, а часом і просто у воді.

Використання фотополімера, як і в стереолітографії, зажадає затвердіння ультрафіолетом, тому надрукований шар засвічується УФ-лампою. Віск ж твердне при природному охолодженні. Звичайно, воскові моделі не відрізняються особливою міцністю, але їх дуже легко використовувати при виготовленні форм для лиття.

Як і в звичайному струменевому друці, використання матеріалів різного кольору дозволить створювати за один цикл багатобарвні моделі, а змішання базових кольорів дасть можливість отримувати безліч відтінків. Крім цього, можна поєднувати в одній моделі матеріали з різними властивостями - наприклад, тверді і еластичні.

Пошарове склеювання плівок (Laminated Object Manufacturing, LOM) (рисунок 4). Тонкі листи матеріалу розрізаються лазерним променем або спеціальним лезом, а потім тим чи іншим способом з'єднуються між собою. Для створення 3D-моделей може використовуватися не тільки пластик, але навіть папір, кераміка або метал [5].

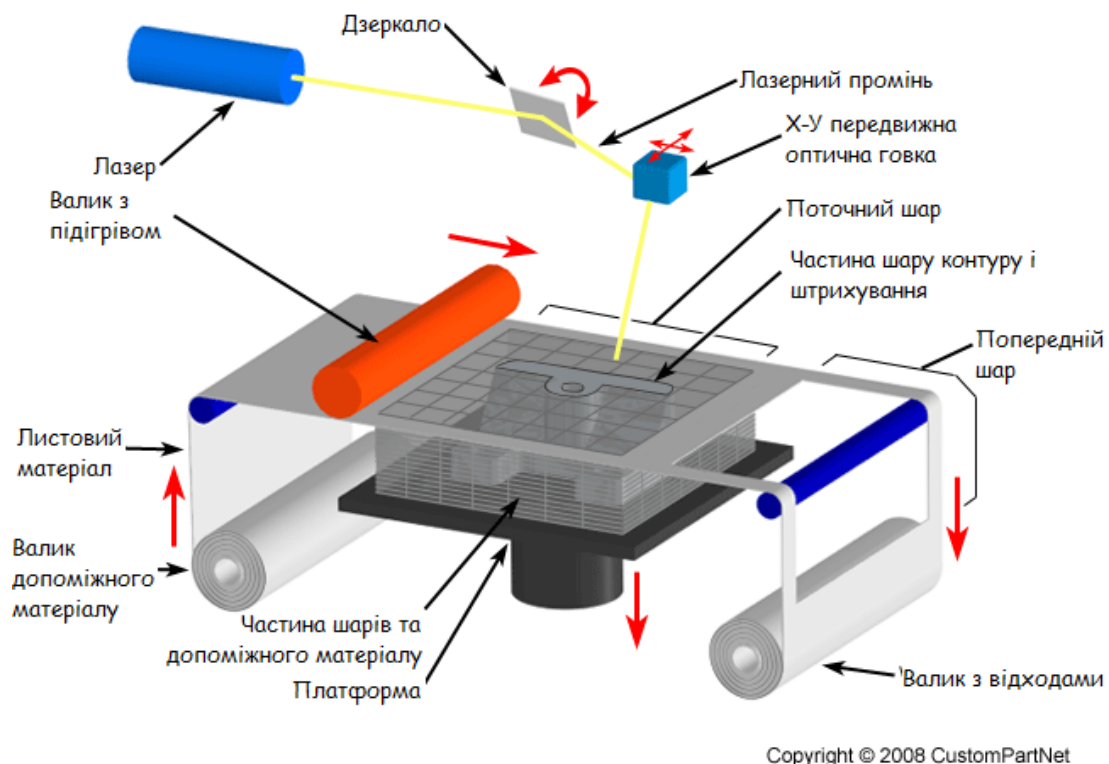


Рисунок 4 – Технологія пошарового склеювання плівок

Створення моделі ведеться в кілька етапів: на першому пачка паперу завантажується в 2D-принтер і на кожному з листів в кольорі друкується потрібний шар.

Потім видрукувані листи переносяться оператором в 3D принтер, де спеціальним лезом на кожному з них робиться проріз по межі нанесеного зображення, а потім листи склеюються між собою. На третьому етапі оператор вручну видаляє зайвий папір, що не містить зображення, що для складних моделей може зайняти чимало часу.

Струменевий тривимірний друк (3DP, 3D-друк) (рисунок 5), метод, як і в SLS, основою для майбутнього об'єкта є порошок (гіпсовий композит), тільки він не спікається, а пошарово склеюється введенням сполучної речовини [5].

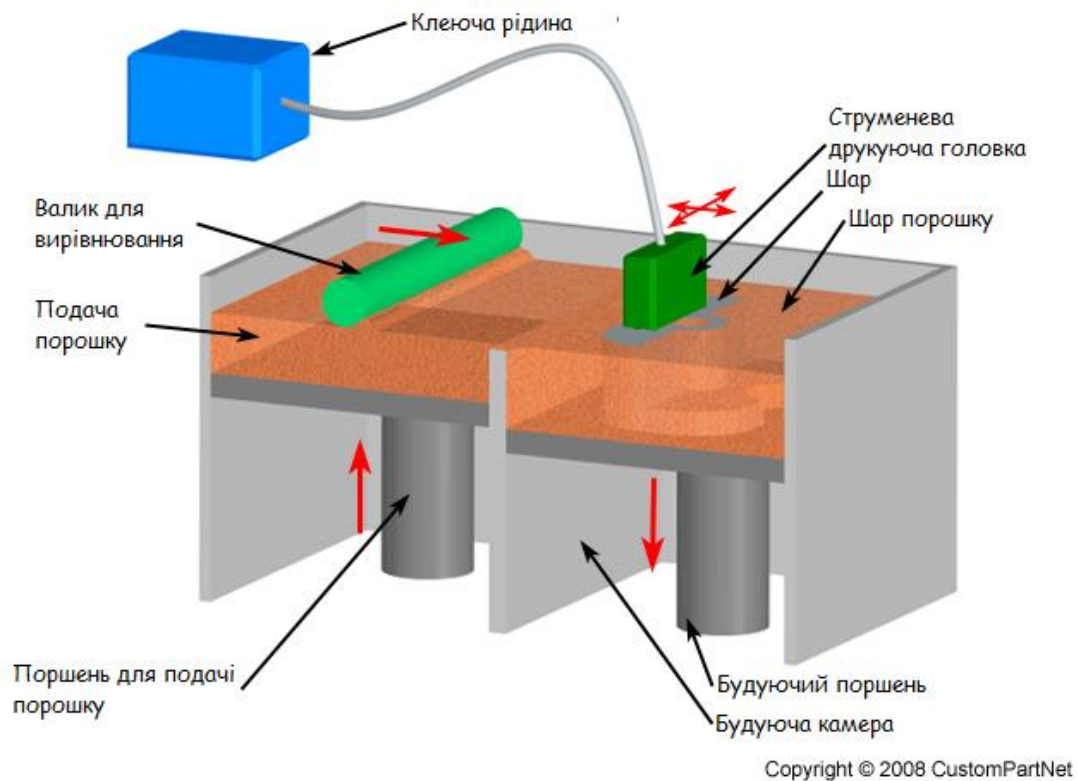


Рисунок 5 – Технологія струменевого тривимірного друку

Для побудови чергового шару моделі по всій площі робочого столу валиком наноситься і розрівнюється порошок, який друкується головкою, що нагадує струменеву, по якому вигляді даного перетину моделі вводиться рідкий клей. До речі: є згадки, що головки розробляються Hewlett-Packard. Потім стіл з уже створеними шарами опускається і процес повторюється потрібну кількість разів, а по закінченні відбувається нагрів для прискорення висихання клею. Після

цього зайвий порошок, що залишився непов'язаним, віддаляється: в основному автоматично, повертаючись в бункер для подальшої роботи, а з важкодоступних місць - струменем повітря (станція очистки може бути вбудована в дорогі моделі) або пензлем.

Але в моделі, що вийшла залишаються пори - простір між частинками порошку, а поверхня виходить шорсткою. Для додання потрібних властивостей (гладкості, міцності, малої гігроскопічності) її потрібно обробити спеціальним складом-закріплювачем. У його якості може виступати розчин англійської солі (гептагідрат сульфату магнію), віск, парафін, ціанокрілати і епоксидної смоли; частина з них можна наносити простим обприскуванням або зануренням, а для інших використовуються спеціальні станції.

Попшарове наплавлення (Fusing Deposition Modeling, FDM) (рисунок 6). Як і у всіх інших розглянутих нами технологіях, модель при FDM-друку створюється пошарово. Для виготовлення чергового шару термопластичний матеріал нагрівається в друкуючій голівці до напіврідкого стану і видавлюється у вигляді нитки через сопло з отвором малого діаметра, осідаючи на поверхні робочого столу (для першого шару) або на попередньому шарі, з'єднуючись з ним. Головка переміщається в горизонтальній площині і поступово «малює» потрібний шар - контури і заповнення між ними, після чого відбувається вертикальне переміщення (найчастіше опускання стола, але є моделі, в яких піднімається головка) на товщину шару і процес повторюється до тих пір, поки модель не буде побудована повністю [5].

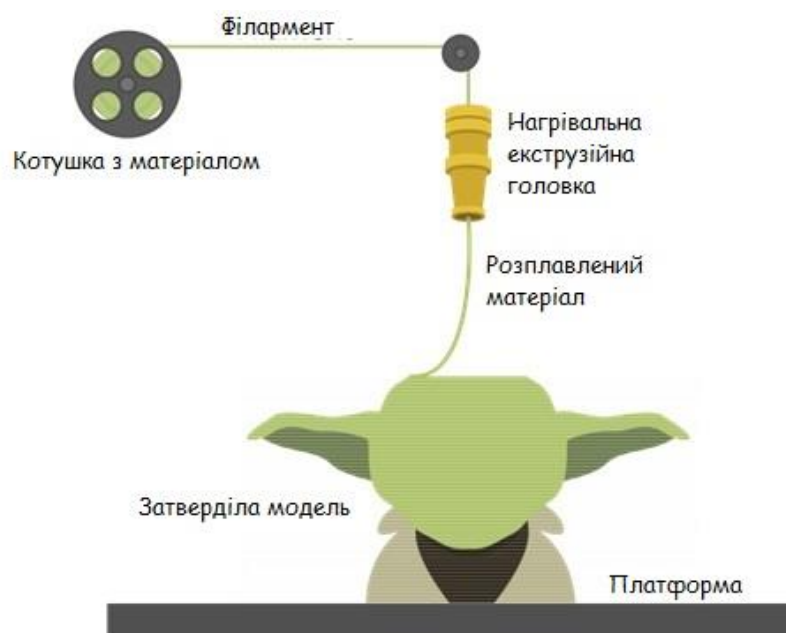


Рисунок 6 – Технологія пошарового наплавлення

В якості витратного матеріалу найчастіше використовуються різні пластики, хоча є і моделі, що дозволяють працювати з іншими матеріалами - оловом, сплавами металів з невисокою температурою плавлення і навіть шоколадом.

### 1.5 Категорії 3D принтерів

Більшість моделей харчових 3D принтерів можуть створити тільки певні різновиди їжі, наприклад, різні піци або тільки торти. Як приклад візьмемо принтер, що виготовляє улюблену їжу мексиканців - буріто.

Мова піде про простий технологічний проект - Burritob0t 3D printer.

У його основі лежать свіжі млинці, які він потім автоматично наповнює різною начинкою в різних пропорціях і поєднаннях, що дає можливість виготовляти різні буріто.

Принтер зібраний із стандартних компонентів і вийшов, за словами творця, «навіть простіше, ніж він збирався його зробити» - справа в тому, що від співпраці з Марко Манрікезем (Marko Manriquez) відмовилися всі місцеві мексиканські кулінари, до яких він звернувся, - нікому з них ідея створення автономного 3D принтера чомусь не сподобалася [6].

Такий принтер має електронну систему пошарового друку, що називається FabApps та використовує різноманітні харчові чорнила.

Також на такому принтері можна роздрукувати більш щільні продукти, такі як класичний гамбургер, що наповнений гірчицею та кетчупом.

На даний момент існує величезна кількість харчових принтерів. Не має сенсу намагатися їх перерахувати, можна поділити їх на дві різні великі групи.

До першої належать звичайні принтери, які використовують напівфабрикати та кондитерські наповнювачі, режими приготування та різні поєднання яких призводить до того, що на виході ми отримуємо різні продукти певної категорії. До другої належать високотехнологічні хімічні принтери, що синтезують потрібні нам речовини фактично «на льоту». Поряд з їх більшою складністю і універсальністю, у багатьох випробувачів відразу виникають побоювання, чи не будуть вони шкідливі для людського здоров'я, адже такий процес синтезу повністю протилежний тому, що відбувається вже в нашому шлунку при перетравленні їжі.

Великим плюсом даного методу створення штучної їжі є можливість регулювання кількості білків, жирів і вуглеводів та збагачувати її вітамінами і

мікроелементами в разі необхідності.

3D принтери військового призначення. Сучасні пристрої друку здатні виготовляти не тільки їжу. Виявилося, що таким способом економічно доцільно виробляти цілі ракетні двигуни. На даний момент таких проектів вже кілька. Подібний принтер знаходиться у NASA де виготовляють складові частини подібних двигунів.

Було зроблено декілька успішних спроб виробництва повністю функціональної зброї. Наприклад, щоб продемонструвати перспективність технології 3D друку і їх доступність практично для будь-яких цілей група розробників під керівництвом Коді Вілсона демонстративно вибрала для клонування найпопулярнішу в США зброю M-4[6].

На даний момент кілька колективів в США продемонстрували концепт виробництва самої різної зброї на підручних 3D принтерах, деякі проекти навіть дають можливість вільно скачати вже готові 3D моделі для всіх бажаючих (найвідоміший з них, мабуть, це Wiki Weapon Project).

3D принтери, що застосовуються у будівництві. Група вчених з британського Університету Лафборо під керівництвом доктора Сунгву Ліма розробляє нові підходи застосунку 3D друку в будівництві. Проект фінансується з коштів Дослідницької ради інженерних і фізичних наук (EPSRC) при Інновацій в промисловості і будівництві Університету Лафборо.

В своїй роботі будівельні 3D принтери використовують технологію екструдуювання, при якій кожен новий шар будівельного матеріалу накладається принтером поверх попереднього шару. Про високу точність друку в даному випадку говорити не доводиться, бо це не критично для будівництва, так як бетон легко піддається подальшій обробці. Зате 3D друк дозволяє отримати унікальні бетонні форми без опалубки, істотно скоротивши при цьому витрати живої праці та час здачі об'єкта.

Застосування 3D принтерів в будівництві дозволить відійти від традиційних форм будівель і створювати будинки неправильної форми, з вигнутими контурами і лініями. За допомогою 3D-друку можна зводити розкішні креативні будинки з унікальними елементами конструкцій.

Уявіть собі щось естетично досконале і при цьому вибудоване за все за кілька годин без потенційної небезпеки для будівельників. 3D друк бетоном буде також корисним для будівництва будинків в місцевостях, які постраждали від стихійних лих, в бідних країнах, що розвиваються країнах і у всіх інших випадках, коли потрібно за короткий час забезпечити житлом велику кількість людей.

В даний час концепція будівництва будівель за допомогою 3D принтерів вже зацікавила кілька великих будівельних компаній, які готові використовувати

цю технологію на практиці. Нема ніяких сумнівів, що в найближчому майбутньому використання 3D принтерів в будівництві стане реальністю. за самим сміливим задумам 3D принтери можна буде використовувати не тільки для будівництва невеликих котеджів, але і для зведення хмарочосів.

Медичні 3D принтери. Компанія Oxford Performance Materials, штат Коннектикут, США повідомила про успішно проведеної операції, в результаті якої пацієнт отримав імплантант шматка черепа, після того, як була створена точна модель його черепа з допомогою 3D сканера. Ця модель враховує всі індивідуальні особливості будови черепа пацієнта і характер травми і дозволяє виготовити ідеально відповідний імплант. Причому надрукований череп не є монолітним шматком пластмаси, він створений з 23 кісток з яких складається наш череп. На його поверхні вигравірувані всі дрібні деталі. На виготовлення подібного черепа пішло 2 тижні після сканування. Це вже зараз допомагає багатьом людям в США з черепно-мозковими травмами [6].

За допомогою 3D принтерів вже друкують багато протезів, причому з урахуванням індивідуальних особливостей людини. Так на виставці «Inside 3d printing» було представлено багато різних протезів, причому навіть особливо складних, які в реальному житті відчувають сильні навантаження.

## **1.6 Програми 3D моделювання**

Завдяки революції 3D друку і доступності 3D принтерів, в даний час існує безліч різних програм і додатків для створення 3D моделей. Пішов в минуле той час, коли було потрібно мати спеціальну освіту, знання технічної англійської мови і багато часу для створення найпростішої віртуальної, об'ємної 3D моделі. Є багато великих професійних програм моделювання, які використовують фахівці для створення 3D графіки, складних багат шарових віртуальних моделей. Всі вони коштують досить дорого, вимагають багато часу на вивчення, і вимогливі до системних можливостей комп'ютера і його комплектуючих.

Сьогоднішні програми для 3D принтера дозволяють практично повністю автоматизувати друкований процес і значно спростити поводження з високотехнологічної технікою.

Практично всі 3D друкуючі пристрої управляються так званим G-кодом - це загальноприйнята мова, яка застосовується для апаратів цього виду.

Таке найменування охрестили в 60-й роки мови для верстатів з ЧПУ. Його почала розробляти американська компанія Electronic Industries Alliance, потім

стали застосовувати практично всі виробники і користувачі автоматизованих верстатів.

G-код є структурою і синтаксис написання команд для обробного верстата. G-код має міжнародну базову структурну основу, затверджений американською та європейською системою стандартизації. Однак існує безліч специфічних доповнень і модифікацій, які локально використовують виробники верстатів і великі корпорації, що випускають обладнання.

Для того, щоб отримати будь-який виріб в 3D потрібно вирішити два завдання:

- створити математичний опис об'єкта - об'ємна модель;
- пояснити обладнанню, як її друкувати - в який момент часу в яку точку додати матеріал і як його отвердити.

Для побудови тривимірних об'єктів, як і для управління друком, існують спеціальні програми для 3D принтера.

Програми, які здійснюють 3D друк працюють з моделями тривимірних об'єктів. Вони не тільки мають різні конфігурації побудови файлів, але і не однакові за наповненням. Моделі об'ємних об'єктів діляться на два види:

- твердотільні;
- поверхневі - сітка.

Твердотільний об'єкт (Solid) - векторна модель, що описує тіло повністю за допомогою математичних векторів. У ній кожній точці має значення (координати, вага, колір, будь-які інші властивості). Так як властивості і координати описані за допомогою векторів такий об'єкт має нескінченну деталізацію.

Поверхневий об'єкт (Mesh) - модель, описана «сітка». Математичними векторами описані тільки «нитки» сітки, що покривають поверхні предмету. Сітка має крок між нитками, що визначає точність опису властивостей моделі та її частини.

Твердотільні моделі містять багато інформації, яка вимагає велику кількість ресурсів. Поверхневі об'єкти значно менше за обсягом, але точність відображення їх властивостей обмежена параметрами сітки.

Деякі промислові друкуючі прилади, як і складні верстати з ЧПУ «вміють» працювати з твердотільними масивами. Однак, всі масові побутові та промислові принтери заточені тільки для роботи з поверхневими (мережевими) моделями.

Слайсер - це утиліта, яка вміє з поверхневого масиву зробити нарізку паралельними площинами і перевести отриману інформацію в G-код. Адже головка екструдера працює саме таким чином, будуючи об'єкт послідовним нарощуванням «зрізу» поверхні в паралельних площинах.

Тому при виході на ринок тривимірних принтерів з'явилися утиліти, які нарізають ці площини і, потім, керують драйверами крокових двигунів і соплами



принтера. З розвитком друкарської справи в цій галузі, слайсер стали оснащувати і простими інструментами побудови тривимірних об'єктів [7].

Розглянемо найпоширеніші з них:

- Cura - одне з найбільш зручних і інтуїтивно зрозумілих програм від виробника 3D принтерів Ultimaker. Отримав найбільше поширення - це найпопулярніший слайсер для 3D принтера. Крім інструментів редагування, налаштувань матеріалу, опцій друку, включений ряд зручних функцій з розрахунку кількості матеріалу і його вартості, ваги виробу. Має відкритий код. Повністю безкоштовна, оновлювана утиліта;

- Slic3r - один з найбільш універсальних і опрацьованих продуктів з точки зору побудови і редагування G-коду для принтера. Є налаштування практично всіх функцій безпосереднього друку, є підтримка кількох сопел і кілька типів застосовуваного матеріалу. Реалізована можливість редагування G-коду користувачем;

- Kissslicer - є дві версії цього ПО - платна і безкоштовна. Серед переваг продукту - мультиплатформеність, можливість генерувати нестандартні і надійні варіанти підтримок для друку складних об'єктів, одна з версій програми підтримує друк через Raspberri Pi. До недоліків можна віднести велику витрату філаменту на підтримку, відсутність функції зворотного втягування філаменту при переміщенні екструдера і некоректна робота з деякими видами 3D-принтери;

- Makerbot desktop - це оболонка від відомого виробника 3D-обладнання, яка містить два слайсера - Skeinforge і Slic3r. На жаль, підтримка по Skeinforge була припинена ще кілька років тому, тому краще для генерування коду вибрати другий варіант. Програма має дружній інтерфейс, прямий доступ до сховища 3D-моделей і в основному заточена під фірмові 3D-принтери Makerbot [8].

Засоби, які призначені для тривимірного моделювання набагато могутніші. У них можна будувати об'єкти будь-якої складності і деталювання. Але робота з ними вимагає певних навичок. Проте, інструменти САПР (CAD або CADD - система автоматизованого проектування) теж отримали значний розвиток з появою тривимірної друку. Сьогодні всі потужні програми моделювання мають вбудовані можливості по компіляції своїх моделей в файл формату \* .stl.

Розглянемо найпоширеніші з них:

- Solidworks - утиліта, заснована на тривимірному твердотільному і поверхневому параметричній проектуванні. З її допомогою конструктори створюють об'ємні деталі і складають збірки у вигляді тривимірних електронних моделей;

- Autodesk Inventor - програма, орієнтована на документацію (проектування і випуск). Сумісна з AutoCAD і підтримує формат DWG. Її використовують вже більше 25 років для тривимірного параметричного моделювання об'єктів, для яких

характерна висока ступінь складності;

- компас 3D - це система, що дозволяє вести автоматизоване проектування з оформленням проектної та конструкторської документації відповідно до встановлених стандартів. Даний сервіс російської розробки і відрізняється рядом можливостей:

1) автоматична генерація асоціативних рядів тривимірних об'єктів (в тому числі розрізів, перетинів, видів по стрілці і так далі);

2) побудова стандартних видів в проекційної зв'язку автоматично. Ведеться синхронізація даних тривимірної моделі;

3) тривимірні моделі і креслення можна пов'язувати зі специфікаціями;

- Blender - це безкоштовний 3D-редактор, який має відкриті вихідні коди і великі можливості. З її допомогою створюються і візуалізуються архітектурні елементи, інтер'єри, мультиплікаційні фільми, ігри. Головною перевагою програми - це наявність великої кількості зовнішніх візуалізаторів. Крім того, в пакеті сервісу доступні засоби моделювання, анімація, рендерінг, можливість обробляти відео після його створення. Сьогодні Blender популярний як швидкий і постійно вдосконалювальний безкоштовний 3D-редактор. У порівнянні з іншими подібними програмами дана відрізняється невеликим розміром;

- CATIA - система проектування, яку розробила фірма DassaultSystemes. У ній можна описувати вироби, після чого моделювати їх на різних етапах. По суті CATIA є лінійкою програмних продуктів, яка відповідає вимогам основних промислових галузей.

## РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

### 2.1 Основні компоненти 3D принтера та їх принцип дії

До основних компонентів 3D принтера належать:

- напрямні осі;
- екструдер;
- система зворотньої тяги;
- нагрівачі елементи;
- платформа;
- крокові двигуни;
- датчики крайнього положення;
- блок живлення;
- драйвери крокових двигунів;
- керуюча плата.

Напрямні осі. Найскладніша частина 3d принтерів - це рухливі елементи. Недостатньо просто встановити кілька крокових двигунів, підключити їх до живлення і змусити рухати екструдер. Потрібно навчити їх правильно працювати і точно виставляти головку, яка відповідає за подачу матеріалу.

Для того щоб можна було створювати повноцінні, об'ємні об'єкти, принтер повинен працювати за трьома напрямними: висота, ширина і довжина. Тобто механізми повинні організувати друк так, щоб об'єкт, під час створення міг бути оброблений по осях XYZ. Такий ефект може досягатися за допомогою рухів голівки, платформи, або комбінуванні обох цих способів.

Кожен 3D принтер побудований таким способом, що всі три осі є лінійними. Вони розташовані під прямим кутом один до одного і не змінюють свого положення в процесі друку. Для рухів уздовж осей використовуються зубчасті ремені, шківи, стрижні, двигуни та ін.

Хоча двигуни мають відносно невеликі розміри, вони мають достатню потужність, щоб направляти головку або друковану платформу, з точністю до міліметра. У 3D принтерах використовуються досить дорогі двигуни, так як механізми низької цінової категорії не забезпечать необхідну точність.

Екструдер. Саме поняття «Екструдер» застосовується не тільки в проектуванні і створенні 3D принтерів, воно використовується для того, щоб позначити пристрій, який відповідає за подачу розігрітого матеріалу, в разі 3d принтерів - це розпечена нитка. Екструдери - це та частина 3d принтерів, яка постійно модифікується і доповнюється, для того, щоб розробники змогли

використати найрізноманітніші матеріали. Принцип дії екструдера можна розглянути на рисунку 7.

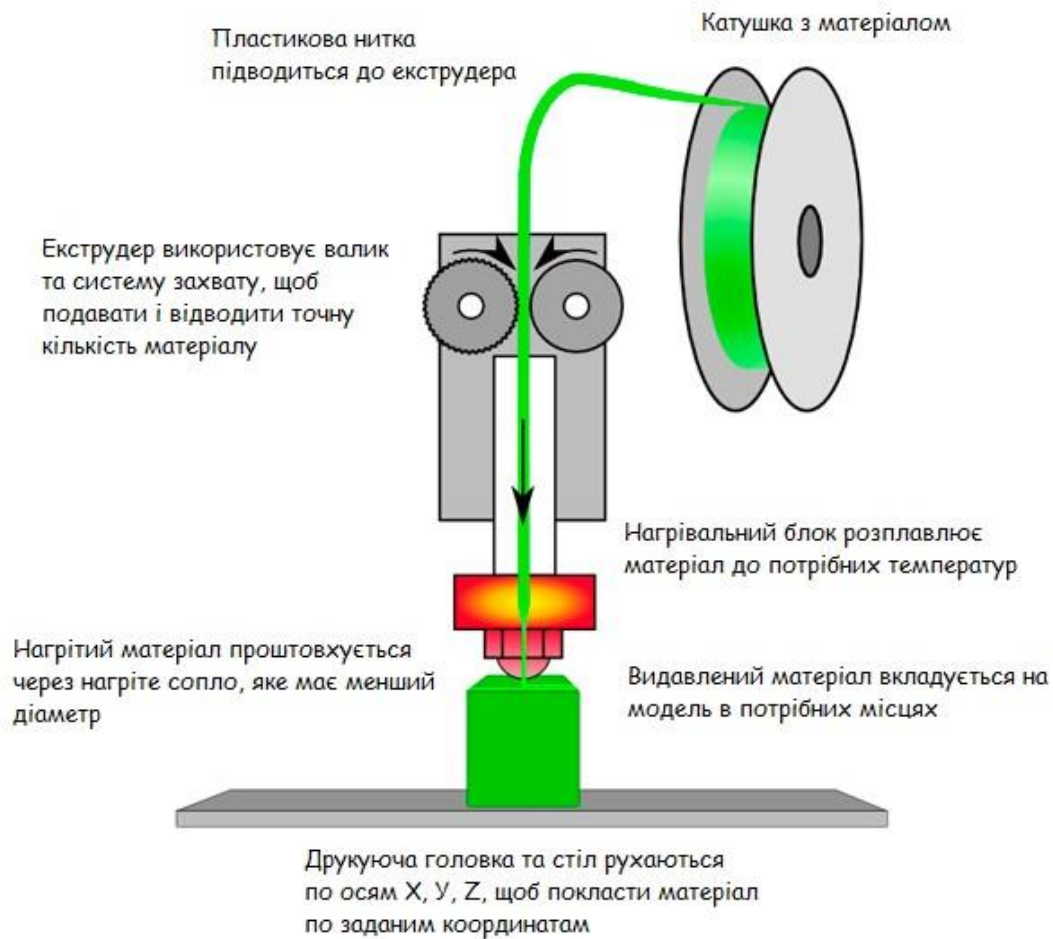


Рисунок 7 – Принцип роботи екструдера

Якщо говорити про термінологію, то з визначенням деяких частин 3d принтерів виникають труднощі, так як сама технологія ще відносно молода і не всі називається стандартними іменами. Головне запам'ятати те, що екструдери подають матеріал за допомогою видавлювання (методом екструзії). Сам матеріал укладається шарами до тих пір, поки вони не буде повністю готове, але про це трохи пізніше.

Кожен з видів розташування екструдерів, незалежно від того, інтегрована це система або ж віддалена, має свої переваги і недоліки.

Інтегрована система не потребує створення складної системи подачі матеріалу на саму головку, тому під час друку рідко виникають які-небудь проблеми, але на відміну від віддалених - цілісні механізми важче у вазі і набагато

повільніше в роботі. Ці характеристики помітно знижують саму швидкість друку пристроїв, але частина часу компенсується простотою заміни пластикової нитки.

У віддалених же системах для подачі матеріалу на голівку використовуються спеціальні порожнисті трубки (боуден-кабель). Вони забезпечують не тільки постійну подачу нитки на екструдер, але і можуть працювати в зворотному напрямку, якщо це необхідно (режим втягування). Віддалена система розташування екструдера приводиться в дію за допомогою так званих тросів.

Найголовніша перевага віддаленого розташування екструдера - невелика вага, який дозволяє домогтися високої швидкості друку. Один з найшвидших принтерів - Ultimaker, якраз-таки використовує саме таку систему розташування екструдера.

Основна проблема порожніх трубок - це велика кількість тертя, що виникає всередині системи подачі матеріалу, в результаті чого можуть виникнути проблеми, пов'язані як з подачею, так і з псуванням самого термопластика (або інших використовуваних матеріалів).

Ще один недолік системи - складності, які можуть виникати в процесі заміни принтера. Тому перед тим як видалити нитку, необхідно включити нагрів самої голівки. Матеріал, після припинення роботи, остигає і твердне, що викликає засмічення. Помилка багатьох початківців користувачів 3D принтерів полягає в тому, що вони намагаються дістати залишки матеріалу силою, але це категорично не рекомендується, так як можна просто пошкодити друкуючу головку і всю систему.

Система зворотної тяги. Спеціальна система відводу, що застосовується в 3d принтерах, дозволяє видалити зайвий матеріал, який раніше був використаний. Під час всмоктування, система подачі починає працювати в зворотному напрямку. Сам процес можна порівняти з ситуацією, коли ви видавили зайву зубну пасту на щітку і збираєте її назад в тюбик.

Під час друку, велика частина пластику подається безперервно, крім тих моментів, коли потрібно створити будь-які зазори в виробі, або для того, щоб перескакувати через раніше роздруковані зазори.

Термопластик під час друку не стає повністю рідким, а в зазорах можуть утворюватися залишки, які потрібно буде видалити. Ці залишки нагадують павутину, а іноді їх кількість просто зашкалює, відповідно перекладається кілька самого друкованого матеріалу. Нехай в одиничних випадках кількість відходів буде невелике, але що якщо справа стосується виробництва промислових масштабів? Власне, для того, щоб не виникало цих залишків якраз і була створена система втягування нитки.

Нагрівачі елементи. Нагрівачий елемент, як правило, складається з

алюмінію і має квадратну або ж циліндричну форму. Він відповідає за розігрів матеріалу і в процесі друку його температура досягає 250 градусів Цельсія. Такі температури вимагають додаткової теплоізоляції, щоб запобігти термічне пошкодження інших складових 3d принтера. Незважаючи на такі температури, шанси на самозаймання пристрої дуже низькі, тому пристрій можна вважати повністю безпечним.

Розжарювальний елемент - це частина екструдера і одним з його елементів є безпосередньо сопло, через яке подається друкований матеріал. Температура розжарювання контролюється термодатчиком.

Діаметр сопла може варіюватися від 0,2 до 0,5 мм і саме від нього залежить максимальний дозвіл, в якому буде створюватися об'єкт. Чим менше сопло, тим дрібніше можуть бути розміри виробу, яке друкується. Але маленький діаметр сопла також впливає на швидкість друку. Якщо ви плануєте швидко друкувати прості вироби - зупиніть свій вибір на соплі з діаметром 0,5 мм.

Термодатчик також є дуже важливою частиною конструкції, так як різні види пластика вимагають певних температур і їх потрібно постійно контролювати.

Термопластична нитка відмотується від котушки і просувається в бік нагріваючих елементів. Далі, вона потрапляє під вплив нагріваючого блоку і стає напіврідкою, після чого проштовхується через сопло назовні. У міру пересування голівки, розплавлений пластик укладається за заданими координатами на спеціальну платформу. Після того як пластик лягає на потрібне місце, він практично відразу остигає і твердне. Цей цикл повторюється до тих пір, поки вони не буде повністю готовим.

Платформа. Всі попередні деталі і механізми відповідають безпосередньо за подачу матеріалу і укладання його за заданою схемою, але є ще один елемент, без якого неможливо здійснити друк 3d виробу, цей елемент - платформа. Саме на неї потрапляють перші шари друкованого виробу.

Платформа найчастіше виготовляється з акрилового плексигласу, алюмінію, скла або ж вуглецевого волокна. Перед покупкою 3d принтера потрібно точно знати, якою буде максимальний розмір платформи, так як саме від нього будуть залежати розміри виробів, які будуть друкуватися.

Крім матеріалу, з якого виготовляється цей елемент, потрібно звернути на наявність підігріву.

Платформи без підігріву на час роботи покриваються спеціальною синьою стрічкою, яка захищена від високого температурного впливу. Ця стрічка сприяє початковій адгезії термопласту і утримує виріб на місці до моменту закінчення друку. Навіть найменший зрушення конструкції з місця може привести до псування всього виробу, що не є допустимим.

Нагріта платформа запобігає деформації і забезпечує більш гладку поверхню першого шару. Температура підігріву може коливатися в межах 60-100 градусів Цельсія. Така температура виходить за допомогою нагрівальної пластини, яка живиться від електрики.

Під час процесу друку потрібно стежити за температурою. Якщо виріб починає деформуватися в верхній частині - тепла занадто багато і потрібно знизити градуси або швидкість друку. Крім цього, може виникнути викривлення виробу або ж зниження рівня адгезії. Однозначно, моделі 3D принтерів, платформи в яких забезпечені функцією підігріву, є набагато практичніше. За допомогою нагрівання можна друкувати об'єкти досить великих розмірів, при цьому не варто турбуватися про деформації.

Крокові двигуни. У рух 3D принтер наводиться за допомогою крокових двигунів. Їх обертання дискретно, тобто вал двигуна роблячи повний оборот послідовно проходить кілька фіксованих положень (кроків). Оскільки розмір кроку відомий, то такий двигун дуже легко змусити повернутися на потрібний кут - потрібно просто подати йому команду повернутися на кількість кроків відповідне необхідному куту. Можливість точного позиціонування позбавляє від необхідності в зворотного зв'язку і складних алгоритмах управління, а це робить крокові двигуни дуже зручними для використання в машинобудуванні. Для принтерів зазвичай використовуються двигуни, які здійснюють 200 кроків на повний оберт (тобто один крок дорівнює  $360/200 = 1.8$  градусам).

У 3D принтері використовується чотири крокових двигуна для позиціонування каретки (по одному на осі X і Y, і два на вісь Z), і один для подачі прутка в екструдер. У типовому варіанті всі використовувані двигуни мають форм-фактор NEMA17. Це саме форм-фактор (по суті - розміри двигуна), а не якась конкретна модель двигуна.

Крокові двигуни використовуються біполярні (вони, в основному, мають 4 виведення). Можна використовувати і уніполярні, просто не задіявши зайві виводи.

При виборі двигуна потрібно звернути увагу на його момент утримання (holding torque). Для двигунів, що приводять у рух каретку досить  $1.4 \text{ кг} \cdot \text{см}$  (якщо вірити RepRap Wiki), а для двигуна екструдера потрібно мінімум  $4 \text{ кг} \cdot \text{см}$ .

Також потрібно звернути увагу на те, який струм споживає двигун, оскільки найчастіше використовуваний драйвер крокових двигунів - DRV8825 має обмеження в 2,2 А. Тому якщо двигуну потрібен струм вище 2,2 А, то в кращому випадку він просто не буде видавати потрібний момент. Напруга особливого значення не має, тому що його регулює драйвер крокової двигуна, що б підтримувати необхідний струм.

Для переміщення каретки я використовував двигуни SY42STH47-1684B.

Це біполярний NEMA17 двигун з моментом утримання в  $4.4 \text{ кг} \cdot \text{см}$ , розрахований на струм в 1.68А. Крім того, це дуже популярна модель, і такі двигуни можна знайти в місцевому магазині.

Драйвери крокових двигунів. Для керування кроковими двигунами зазвичай використовується спеціальний чіп - драйвер крокового двигуна. Можна, звичайно, спробувати обійтися і без нього, і управляти двигуном безпосередньо з мікроконтролера, але такий спосіб зажадає великої кількості додаткових деталей, і, в цілому, не є ефективним. Крім того, в спеціалізованих чіпах - драйверах є вже готова підтримка мікрокрокового режиму. У мікрокроковому режимі ротор двигуна може не тільки дискретно перемикається між кроками, але і "зависати" в проміжних положеннях між двома кроками. Такий режим роботи значно підвищує точність позиціонування, і, крім того, зменшує шум і вібрацію, властиві кроковим двигунам.

Зазвичай для 3D принтерів використовують популярні драйвера крокових двигунів - DRV8825. Вони підтримують струм до двох ампер, і мікрокроковий режим 1/32 (тобто між двома кроками є 32 додаткових мікрокроків, а для двигуна з 200 кроками це цілих 6400 мікрокроків на оберт). При роботі чіп драйвера відчутно нагрівається, тому я б радив встановити на кожен чіп по радіатору, або організувати активне охолодження. Взагалі потрібно по одному драйверу на кожен кроковий двигун.

Датчики крайнього положення. В англійській мові цей пристрій називається endstop, а ось точного перекладу на українську я так і не знайшов, тому будемо називати його кінцевиком, хоча правильніше було б щось на кшталт "датчик крайнього положення".

У простій реалізації кінцевик являє собою звичайну кнопку, яка натискається при досягненні кареткою крайнього положення. Необхідність в такому пристрої виникла тому що крокові двигуни позбавлені зворотного зв'язку - двигун може повернутися рівно на N кроків (або мікрокроків) по або проти годинникової стрілки, але повідомити своє поточне становище він не в силах. Тому перед кожною печаттю принтер встановлює каретку в початкове положення (умовну точку з координатами (0, 0, 0)), а вже щодо неї розраховуються інші координати. Для установки каретки в початкове положення принтер просто крутить двигуни в сторону зменшення координат, поки не отримає сигнал спрацювання від кожного кінцевика.

Зазвичай використовуються три кінцевика - по одному на кожну вісь, для індикації початкового (тобто з мінімальними координатами) положення.

Існує два найбільш поширених варіанта кінцевиків - механічні (по суті - просто кнопка), і оптичні (спрацьовує коли спеціальний прапорець потрапляє в зазор між світлодіодом і фоторезистором). Оптичні кінцевики не містять рухомих



частин і більш точні, тому краще використовувати їх. Є ще магнітні кінцевики, з датчиками Холла, але вони не сильно поширені.

Блок живлення. Зазвичай для живлення принтера використовують напругу 12В. Для живлення самого мікроконтролера потрібно 5В, але він може житись і від USB.

Найпростіший і практичний варіант - звичайний комп'ютерний блок живлення. Його просто знайти, він дешево коштує, і видає потрібні нам напруги (12В і 5В, насправді є ще 3.3В, але вони нам не потрібні). Що стосується потужності - я б радив брати блок живлення здатний віддавати струм близько 20А. Один тільки стіл з підігрівом вимагає 10-12 ампер, а ще двигуни, хотенд, та й вентилятор для обдування моделі рано чи пізно встановити доведеться.

Керуюча плата. Ось ми і дісталися до самого цікавого, "мозку" принтера, ним виступає комплект RAMPS-лат для 3D принтера, який складається з двох основних елементів: плати RAMPS 1.4, що є основною платою системи та плати Arduino Mega 2560, що кріпиться до плати RAMPS знизу. З точки зору системного адміністратора плата RAMPS є материнською платою, до якої кріпляться інші плати розширення, адже саме вона підключена до джерела живлення, на ній розташовані роз'єми двигунів і на ній міститься силова частина електроніки - керуючі польові транзистори для управління нагрівом друкуючих головок (екструдерів) і підігріванням столу. З точки ж зору електронщиків, які працюють з Arduino, сама плата RAMPS є Шилд (shield) - платою розширення для Arduino-лати, що містить мозок системи - мікроконтролер фірми Atmel. Все, що в неї встромляється вище, наслідок того, що цей Шилд досить багатофункціональний, на відміну від звичайних Шилд wi-fi / 3G / Bluetooth / Ethernet-зв'язку, датчиків або дисплейних контролерів, які підтримують лише одну конкретну можливість.

На високому рівні робота контролера виглядає наступним чином - в його пам'ять завантажується (зазвичай за допомогою USB-підключення до комп'ютера, але можна використовувати і SD-карти пам'яті) програма на мові G-code, що описує все що принтеру потрібно зробити для друку моделі, а контролер цю програму виконує, команда за командою.

Умовно контролер можна розділити на дві частини : "логічну" і "силову". Логічною частиною зазвичай виступає мікроконтролер (найчастіше використовують мікроконтролери AVR, але є варіанти контролерів і з ARM процесорами). Силова частина містить все що необхідно для управління потужністю навантаженням - драйвера крокових двигунів, і, звичайно, польові транзистори для столу з підігрівом і хотенда.

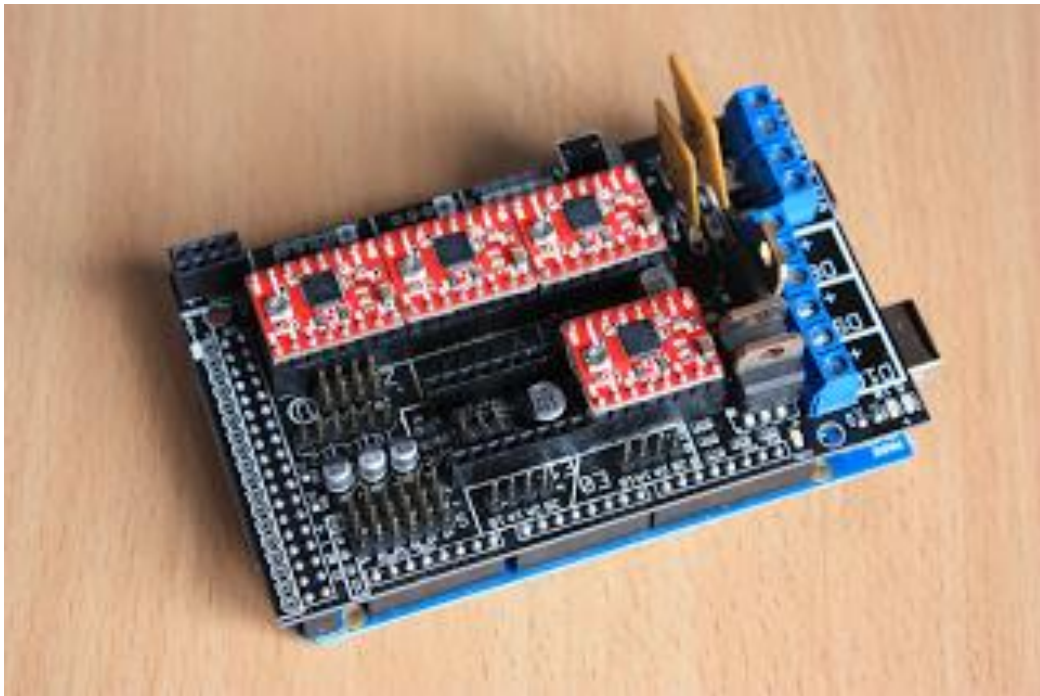


Рисунок 8 – Керуюча плата Arduino Mega 2560 та RAMPS 1.4

Основною причиною вибору саме зв'язки Arduino Mega 2560 + RAMPS 1.4 (рисунок 8) в якості контролера послужила її велика популярність.

## **2.2 Принципова схема та підключення електричних складових 3D принтера**

Тепер про те як все перераховане вище з'єднати воедино. Принципову схему підключення можна розглянути на рисунку 9.

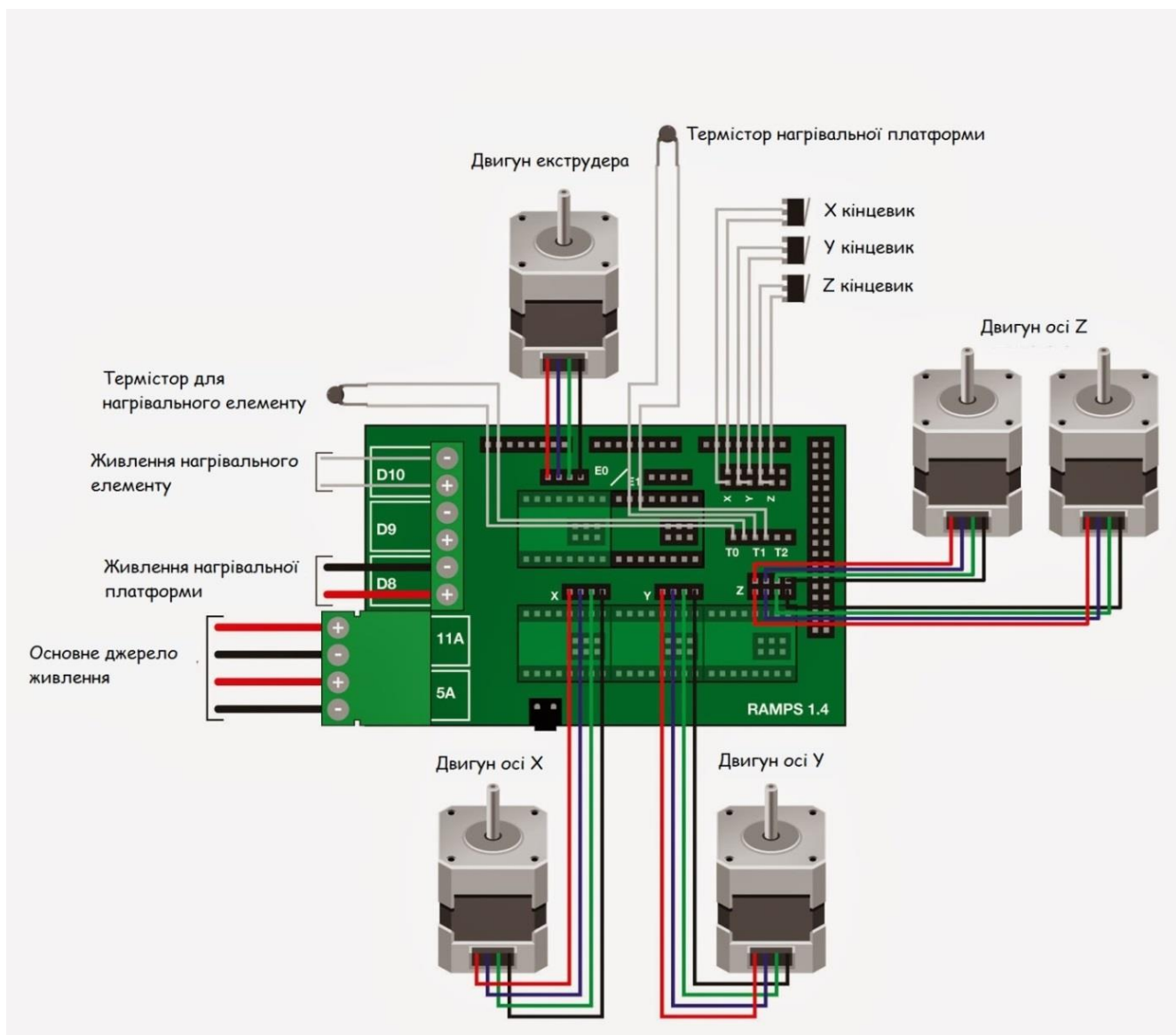


Рисунок 9 – Принципова схема 3D принтера

Крокові двигуни. Піни для підключення крокових двигунів на RAMPS позначені так - 1A, 1B, 2A, 2B. Піни 1A, 1B - одна обмотка двигуна, а 2A, 2B - друга. Щоб визначити який вивід двигуна куди підключати можна подивитися в даташит по двигуну, або ж виміряти опір між висновками - якщо два висновки належать до одного обмотці, опір між ними буде набагато менше, ніж якби вони належали до різних. Правильність підключення можна буде перевірити на етапі калібрування - якщо при подачі сигналу двигун не буде обертатися, або буде вібрувати - досить поміняти два будь-яких дроти місцями і спробувати знову (і так до досягнення бажаного результату). Двигуни осі Z підключаються паралельно, до одного драйверу.

Датчики крайнього положення. На RAMPS передбачено шість роз'ємів для підключення кінцевиків, їх порядок наступний - X min, X max, Y min, Y max, Z

min, Z max. Підключати кінцевики потрібно дотримуючись полярності. Якщо дивитися на роз'єми кінцевиків з боку роз'ємів живлення RAMPS, то порядок пінів буде наступний - Signal, GND, + 5V.

Термістори. RAMPS підтримує три датчика температури, роз'єми для них підписані - T0, T1, T2. У T0 зазвичай підключають термістор хотенда. А T2 я підключив термістор столу з підігрівом. Полярність відсутня.

Нагрівальні елементи. Роз'єми для підключення нагрівальних елементів підписані D8, D9, D10. Резистор хотенда я підключив в D10, а резистори підігрівають стіл в D8. Зверніть увагу, що дроти по яких йде струм для підігріву столу повинні бути розраховані на струм мінімум в 10А, в іншому випадку може оплавитися ізоляція і статися КЗ.

Живлення. Для подачі живлення в RAMPS передбачено два роз'єми - 12V5A і 12V11A. Вхід 12V5A використовується для живлення крокових двигунів, і нагрівачів D9, D10. Вхід 12V11A використовується для живлення нагрівача D8, до якого підключений стіл з підігрівом. Підключати, зрозуміло, потрібно обидва. Входи 12V5A і 12V11A краще живити від різних виходів комп'ютерного блоку живлення.

## 2.3 Програмне забезпечення 3D принтера

Найперше після складання - налаштування і заливка прошивки для 3D принтера. Я використовував найпоширенішу прошивку Marlin. Завантажуємо її у вигляді zip-архіву і розпаковуємо в окрему папку [9].

Запускаємо Arduino IDE і йдемо в меню Файл-> Відкрити ... Далі знаходимо нашу розпаковану папку з прошивкою Marlin, в ній буде вкладена папка з тією ж назвою Marlin, а вже в ній файл проекту Marlin.ino . Відкриваємо його, і у нас з'являється безліч закладок з файлами прошивки. Головна закладка, яка нас буде цікавити - це Configuration.h. Там зібрані усі основні параметри для нашого 3D принтера. Параметри, які можна налаштовувати, виглядають так: `#define НАЗВА_ПАРАМЕТРА` значення параметра [9].

Деякі параметри йдуть тільки з назвою і без значення. Такі параметри просто включають або вимикають певну функцію прошивки. Щоб вимкнути такий параметр, досить зробити з нього коментарій подвійною косою рисою `//`. Включити такий параметр можна видаленням подвійною косою перед словом `#define`.

Почнемо з вибору контролера (MOTHERBOARD). Список контролерів

знаходиться у вкладці boards.h. Тиснемо на трикутник у правому верхньому кутку і вибираємо boards.h (рисунок 10).

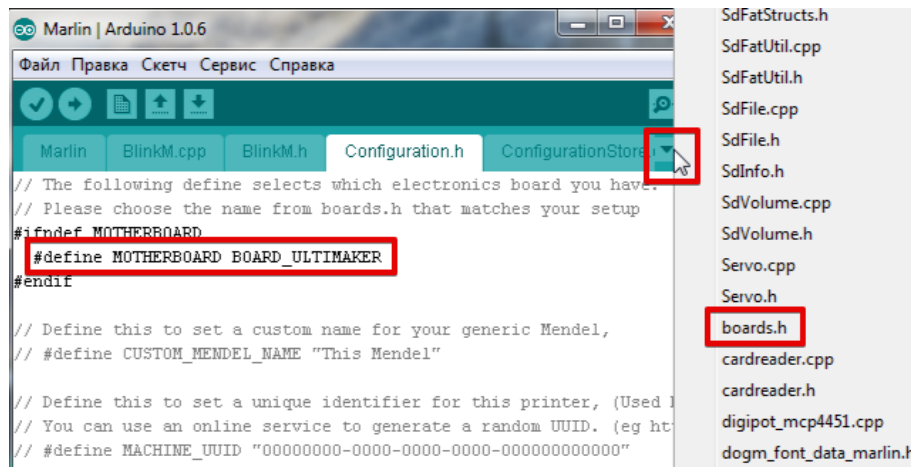


Рисунок 10 – Вибір контролера

В спадаючому вікні з переліку керуючих плат обираємо плату RAMPS 1.4 (рисунок 11).

```
#define BOARD_RAMPS_OLD 3 // MEGA/RAMPS up to 1.2
#define BOARD_RAMPS_13_EFB 33 // RAMPS 1.3 / 1.4 (Power outputs: Extruder, Fan, Bed)
#define BOARD_RAMPS_13_EEB 34 // RAMPS 1.3 / 1.4 (Power outputs: Extruder0, Extruder1, Bed)
#define BOARD_RAMPS_13_EFF 35 // RAMPS 1.3 / 1.4 (Power outputs: Extruder, Fan, Fan)
#define BOARD_RAMPS_13_EEF 36 // RAMPS 1.3 / 1.4 (Power outputs: Extruder0, Extruder1, Fan)
#define BOARD_DUEMILANOVE_328P 4 // Duemilanove w/ ATMega328P pin assignments
#define BOARD_GEN6 5 // Gen6
#define BOARD_GEN6_DELUXE 51 // Gen6 deluxe
#define BOARD_SANGUINOLOLU_11 6 // Sanguinololu < 1.2
#define BOARD_SANGUINOLOLU_12 62 // Sanguinololu 1.2 and above
#define BOARD_MELZI 63 // Melzi
#define BOARD_STB_11 64 // STB V1.1
#define BOARD_AZTEEG_X1 65 // Azteeg X1
#define BOARD_MELZI_1284 66 // Melzi with ATmega1284 (MaKr3d version)
#define BOARD_AZTEEG_X3 67 // Azteeg X3
#define BOARD_AZTEEG_X3_PRO 68 // Azteeg X3 Pro
#define BOARD_ULTIMAKER 7 // Ultimaker
```

Рисунок 11 – Вибір RAMPS 1.4

Заміняю в configuration.h:

**"MOTHERBOARD BOARD\_ULTIMAKER"** на **"MOTHERBOARD BOARD\_RAMPS\_13\_EFB"**.

Наступним вибираємо датчик температури - термістор. Бачимо великий список `"/\ Temperature sensor settings:`. У мене стоїть хотенд E3D-v5 і китайський термістор на столі. Для E3D-v5 я вибираю:

"// 5 is 100K thermistor - ATC Semitec 104GT-2",  
для столу "// 1 is 100k thermistor - best choice for EPCOS 100k",  
яке зображено на рисунку 12.

```
#define TEMP_SENSOR_0 5  
#define TEMP_SENSOR_1 0  
#define TEMP_SENSOR_2 0  
#define TEMP_SENSOR_BED 1
```

Рисунок 12 – Налаштування термісторів

Обмеження максимальної температури хотенда "#define HEATER\_0\_MAXTEMP 275".

Обмеження мінімальної температури хотенда "#define EXTRUDE\_MINTEMP 170".

Якщо кінцевий вимикач підключений не стандартно і його стан потрібно інвертувати, то це можна зробити в прошивці, що не перепаювати дроти. Значення false або true. Команда M119 в Pronterface показує стан кінцевих вимикачів (рисунок 13). У мене кінцеві вимикачі стоять тільки в позиції HOME на MAX [9].

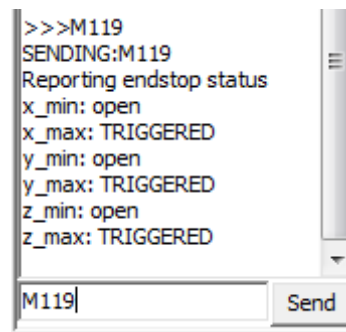


Рисунок 13 – Положення кінцевих вимикачів

Так, як в стандартній версії «прошивки» були описані налаштування, які підходять для налаштування мого 3D принтера, тому я нічого не змінював. Отже, їх налаштування є такими:

```
const bool X_MIN_ENDSTOP_INVERTING = true;  
const bool Y_MIN_ENDSTOP_INVERTING = true;  
const bool Z_MIN_ENDSTOP_INVERTING = true;  
const bool X_MAX_ENDSTOP_INVERTING = true;  
const bool Y_MAX_ENDSTOP_INVERTING = true;  
const bool Z_MAX_ENDSTOP_INVERTING = true;
```

Зміна напрямку обертання крокових двигунів, значення false або true.  
Правильні переміщення сопла щодо столу:

- по осі X - вліво "-", вправо "+";
- по Y - вперед "+", тому "-";
- по осі Z - зближення "-", видалення "+";
- екструдер. Extrude - видавлювання нитки, Reverse (retract) - відкат, втягування нитки.

Фрагмент програми для виконання цих дій представлено нижче:

```
#define INVERT_X_DIR false;  
#define INVERT_Y_DIR false;  
#define INVERT_Z_DIR false;  
#define INVERT_E0_DIR true.
```

Далі йде настройка кінцевих вимикачів. Початок координат знаходиться в ближньому лівому кутку на поверхні столу, якщо сопло вивести в цю точку, то спрацювали б кінцевики MIN, якщо в праву дальню верхню - спрацюють MAX. У мене в положенні HOME знаходяться три кінцевих вимикача MAX, тому мої налаштування:

```
// Sets direction of endstops when homing; 1 = MAX, -1 = MIN;  
#define X_HOME_DIR 1;  
#define Y_HOME_DIR 1;  
#define Z_HOME_DIR 1.
```

Встановлення габаритів переміщення, після ініціалізації в положенні HOME. Тут ми задаємо габарити робочої зони по X і Y, а також налаштування сопла щодо столу.

Якщо при торканні столу соплом спрацьовує кінцевий вимикач (MIN), як у Ultimaker Original, то під налаштуванні сопла щодо столу виконується переміщенням кінцевого вимикача, а в "#define Z\_MAX\_POS" записуємо значення координати при максимальному видаленні сопла від столу. Координату можна дізнатися по команді M114 або подивившись на екран дисплея [9].

Якщо кінцевий вимикач по Z спрацьовує при максимальному видаленні сопла від столу (MAX), то потрібно визначити розмір по Z самостійно. Встановлюємо значення "#define Z\_MAX\_POS" спочатку більше норми, наприклад 250 при габариті 200 мм. Опускаємо сопло до торкання столу і на дисплеї (або по команді M114) бачимо координату більше нуля, тепер віднімемо від встановленого великого значення отриману координату і отримаємо габарит по Z, який тепер запишемо в "#define Z\_MAX\_POS". За підсумками друку першого шару можна буде підкоригувати це значення. Фрагмент цих налаштувань представлено нижче:



```
// Travel limits after homing;
#define X_MAX_POS 215;
#define X_MIN_POS 0;
#define Y_MAX_POS 215;
#define Y_MIN_POS 0;
#define Z_MAX_POS 200;
#define Z_MIN_POS 0.
```

Можна підкоригувати швидкість переміщення в положення HOME.

```
#define HOMING_FEEDRATE {50 * 60, 50 * 60, 4 * 60, 0} // set the homing
speeds (mm / min).
```

Переходимо до найважливішого. Налаштування кроків переміщення по осях (рисунок 14). Екструдер теж вісь. Мої налаштування.

```
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT { (200*16)/(2.0*20), (200*16)/(2.0*20), 200*16/1.25, 3200 * 39.0/(11.0 * 6.75 * 3.45) }
```

X

Y

Z

Екструдер

Рисунок 14 – Налаштування кроків переміщення по осям

Тепер подивимося, як я їх отримав. По всіх осях стоять крокові двигуни 200 кроків на оберт, 16 мікрокроків на крок (встановлюється перемичками на платі). По осях X і Y варто приводний ремінь GT2 з кроком 2 мм і 20-ти зубі шківів, разом отримуємо формулу  $(200 \cdot 16) / (2.0 \cdot 20)$ . По осі Z стоять шпильки M8 з кроком різьби 1,25 мм, разом формула  $200 \cdot 16 / 1.25$ .

Знаходимо специфікації (даташит) (рисунок 15) на встановлені крокові двигуни (рисунок 16). Бачимо, що за один крок вал повертається на 1,8 градуса, а це значить  $360 / 1,8 = 200$  кроків на повний оберт.

Model	Step Angle (°)	Motor Length L(mm)	Rate Voltage (V)	Rate Current (A)	Phase Resistance (Ω)	Phase Inductance (mH)	Holding Torque (g.cm)	Lead Wire (NO.)	Rotor Inertia (g.cm <sup>2</sup> )	Detent Torque (g.cm)	Motor Weight (kg)
42BYGHW609	1.8	40	3.4	1.7	2	3	4000	4	54	220	0.24

Рисунок 15 – Технічні характеристики крокового двигуна

Заміряємо ділянку гвинта і вважаємо на ньому витки, потім довжину ділянки в міліметрах ділимо на кількість витків  $20/16 = 1.25$  мм. Для більш точного результату заміряємо ділянку максимальної довжини.



Профілі ременів (рисунок 16), зазвичай використовуваних на 3D принтерах і їх крок (рисунок 17).

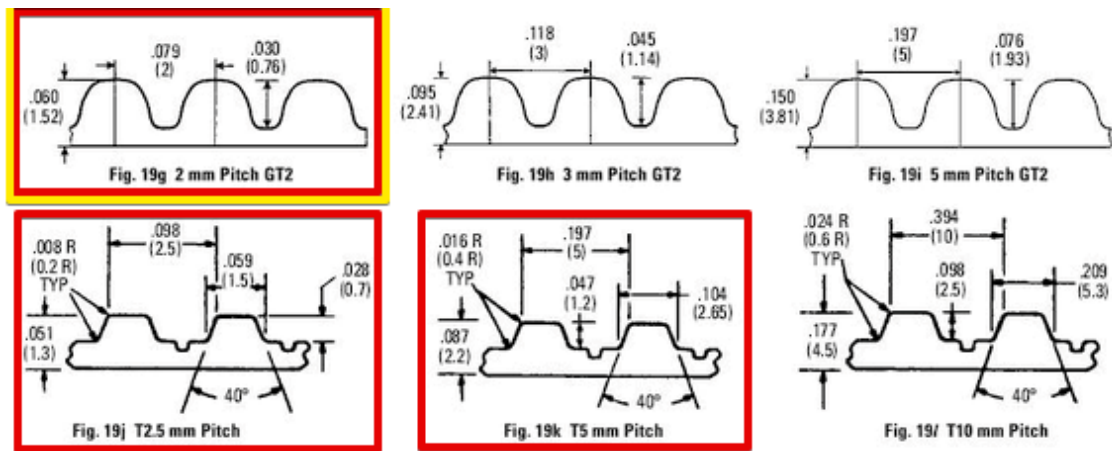


Рисунок 16 – Профілі ременів

	Belt Type	Pitch		Allowable Working Tension Per 1 Inch of Belt Width					
				Neoprene		Urethane/Polyester		Urethane/Kevlar	
		Inch	mm	lbf	N	lbf	N	lbf	N
19a	MXL	0.080	2.03	18	80	20 to 32	89 to 142	32 to 70	142 to 311
19b	40DP	0.0816	2.07	—	—	20 to 32	89 to 142	32 to 70	142 to 311
19c	XL	0.200	5.08	28	125	32	142	40	178
19d	L	0.375	9.525	49	218	—	—	—	—
—	H	0.500	12.7	135	601	—	—	—	—
19e	HTD	0.118	3	64	285	—	—	—	—
19f		0.197	5	102	454	—	—	—	—
—		0.315	8	178	792	—	—	—	—
19g	GT2	0.079	2	25	111	—	—	—	—
19h		0.118	3	114	507	—	—	—	—
19i		0.197	5	160	712	—	—	—	—
—		0.315	8	380	1690	—	—	—	—
—	T	0.551	14	650	2891	—	—	—	—
19j		0.098	2.5*	70	312	—	—	—	—
19k		0.197	5*	209	930	—	—	—	—
19l		0.394	10*	405	1800	—	—	—	—

Рисунок 17 – Характеристики ременів



Рисунок 18 – Шків для обраного ременя

Налаштування екструдера залежить від коефіцієнта редукції і діаметра подає шестерні. Підберемо експериментально, після першої заливки прошивки в 3D принтер. Відкручуємо сопло і зменшуємо обмеження мінімальної температури сопла до 5 градусів `"#define EXTRUDE_MINTEMP 5"`. Тепер екструдер буде працювати при холодному соплі, що нам і потрібно. Поки не змінюємо налаштування екструдера. Для настройки я використовую програму Pronterface. Для початку ставимо 50 мм і швидкість 100 мм / сек. 50 мм - це довжина прутка, що проходить через екструдер. Вимірюємо довжину прутка, що пройшов через екструдер лінійкою або штангенциркулем [9].

Підбираючи налаштування екструдера добиваємося точної цифри на розумної довжині прутка, наприклад 300 мм. Після настройки повернемо обмеження мінімальної температури `"#define EXTRUDE_MINTEMP 170"`.

Наступні цифри - це обмеження максимальної швидкості переміщення по осях. На X і Y я ставлю 200 мм, решту не чіпаю.

```
#define DEFAULT_MAX_FEEDRATE {200, 200, 5, 25}
```

Налаштування прискорення переміщень по осях. При великих прискореннях можливі пропуски кроків. Можна підбирати, гаяючи в програмі Pronterface по осях на заданій швидкості. Ось мої налаштування:

```
#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION {1000,1000,100,10000}
```

```
#define DEFAULT_ACCELERATION 1500
```

Залишилося активувати LCD дисплей з SD картою. Свій дисплей я знайшов на RepRap.org і ідентифікував як RepRapDiscount Smart Controller.

Розкоментуємо (приберемо подвійний Слеш) такі рядки:

```
#define ULTRA_LCD
```

```
#define SDSUPPORT
```

```
#define ULTIPANEL
```

```
#define REPRAP_DISCOUNT_SMART_CONTROLLER
```

Пора завантажити керуючу програму (додаток А) в контролер. Для цього потрібно в Arduino IDE правильно виставити тип плати (рисунок 19) і номер COM порту (рисунок 20).

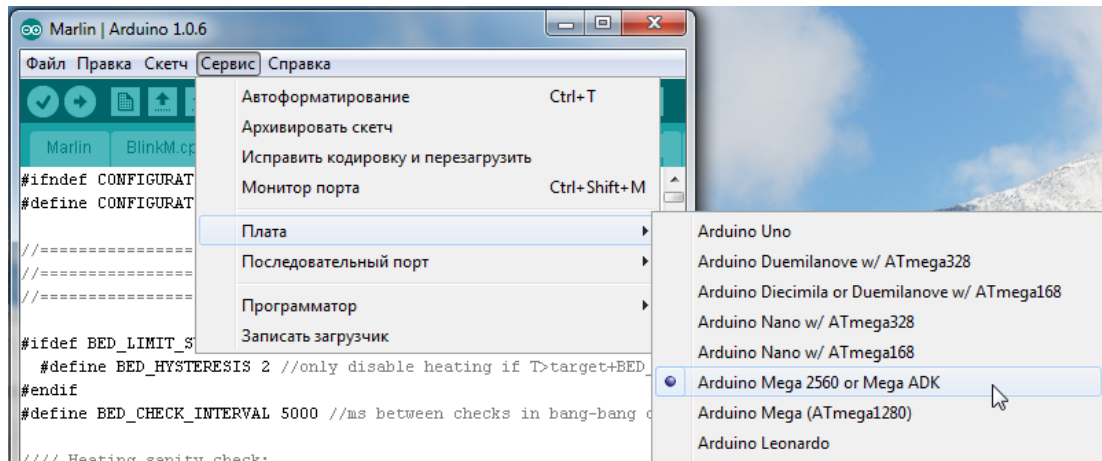


Рисунок 19 – Вибір керуючої плати

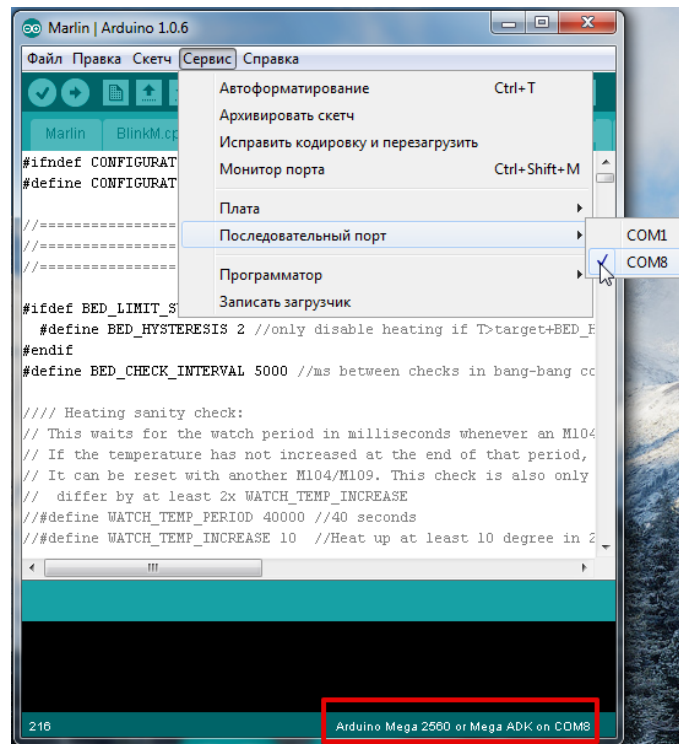


Рисунок 20 – Вибір порту до якого підключена плата

Для завантаження керуючої програми натискаємо на коло зі стрілкою після чого відбувається автоматичне завантаження програми в контролер (рисунок 21).

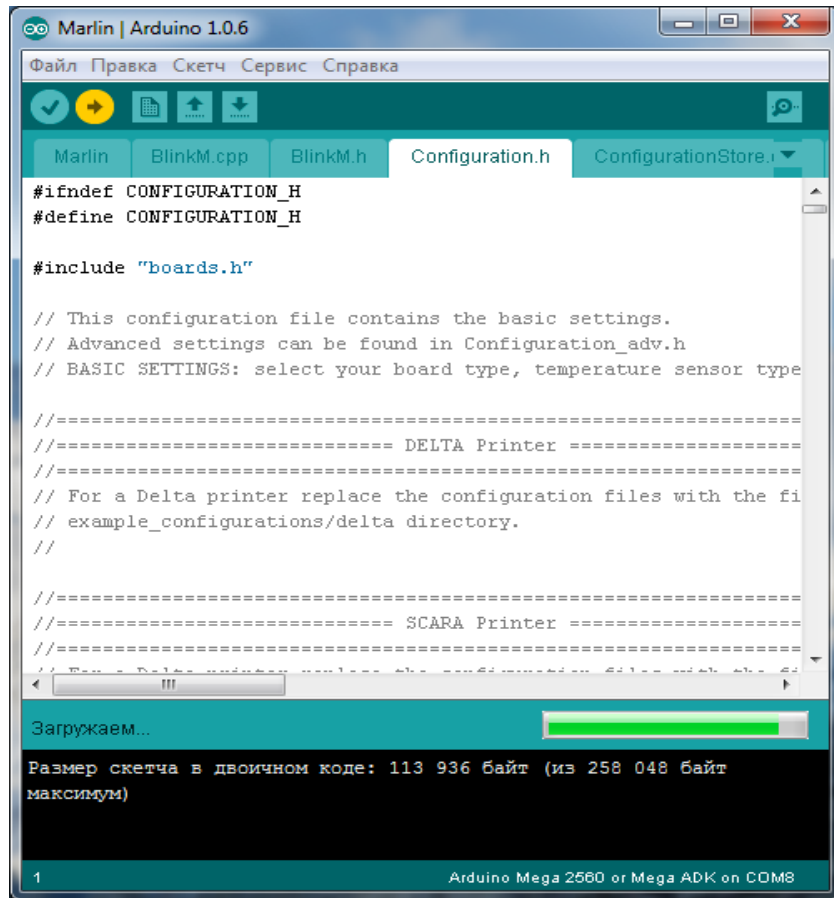


Рисунок 21 – Вікно завантаження керуючої програми

## ВИСНОВКИ

Метою дипломного проекту були побудова та програмування 3D принтера, який друкує методом екструзії.

В оглядовій частині пояснювальної записки були подані короткі відомості про історію розвитку 3D друку, розглянуті принципи роботи 3D принтерів та їх області застосування. Це 42% - промисловість, проектування та розробки, 18% - архітектура та будівництво, 14% - товари народного споживання, 8% - культура та мистецтво, 6% - освіта, 4% - інформаційні технології, 3% - медицина та охорона здоров'я, 3% - наука, 1% - інше

Широко розкриті технології 3D друку принтерів, такі як, стереолітографія SLA (VAT Photopolymerisation), струменевий тривимірний друк 3DP (Binder Jetting), екструзія матеріалу (Material Extrusion), спікання порошків (Powder Bed Fusion), пошарова ламінація (Sheet Lamination) та електронно-променева плавка (Directed Energy Deposition).

Були описані програми для 3D моделювання та визначено, що серед систем автоматизованого проектування (САПР) найбільшу популярність сьогодні придбали так звані системи середнього класу, зокрема: SolidWorks, Autodesk Inventor, КОМПАС-3D, Blender, CATIA. А серед спеціалізованих програм слайсерів найбільшого поширення набули: Cura, Slic3r, Kissslicer, Makerbot desktop.

В проектно-конструкторській частині описані основні компоненти 3D принтера та їх принцип дії. До них належить датчик крайнього положення, крокові двигуни, драйвери двигунів, екструдер, термістори, робоча платформа, керуюча плата та блок живлення. Для керуванням даного 3D принтера використовується 2 плати - RAMPS 1.4 та Arduino Mega 2560. RAMPS 1.4 є надбудовою для Arduino Mega 2560.

Розглянуто принципову схему та підключення електричних складових 3D принтера. Завантаження програми керування відбувалось за допомогою Arduino IDE та проведено калібрування керуючої програми.

Проект включає в себе розробку комплексу конструкторської документації для виготовлення пристрою: принципова схема, деталювання складних одиниць та тривимірна модель.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ревич, Ю.В. 3D в натуре / Ю.В.Ревич //Компьютерра. 2009. №8. С. 37-41.
2. История развития 3D-печати [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://pechat-3d.ru/>
3. Як працює 3D принтер [Електронний ресурс]. – Режим доступа : <http://mojaosvita.com.ua/tehnologii/yak-pracyuye-3d-printer/>
4. Сферы применения 3D печати [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://3dsmart.com.ua/blog/sfery-primeneniya-3d-pechaty>
5. Технології 3D друку [Електронний ресурс]. – Режим доступа : [http://www.ixbt.com/printer/3d/3d\\_tech.shtml](http://www.ixbt.com/printer/3d/3d_tech.shtml)
6. Категории 3D принтеров [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.school.tver.ru/system/documents/files/000/004/588/original/1413449107.pdf?1413449107>.
7. Обзор слайсеров для подготовки модели к 3D печати [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://3dboom.su/blog/obzor-slayserov-dlya-podgotovki-modeli-k-3d-pechaty.html>
8. Обзор лучших универсальных слайсеров для подготовки к 3D печати [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://3dprintexpo.ua/ru/article/obzor-luchshih-universalnih-slayserov-dlya-podgotovki-k-3d-pechaty-61468>
9. Налаштування прошивки Marlin [Електронний ресурс]. – Режим доступа : <http://3dtoday.ru/blogs/akdzg/custom-firmware-marlin-and-pour-it-into-a-3d-printer/>

## ДОДАТКИ

### Додаток А

#### Лістинг програми

```
#define CONFIGURATION_H
#define CONFIGURATION_H
#define CONFIGURATION_H_VERSION 010100
#define STRING_CONFIG_H_AUTHOR "(none, default config)" // Who made
the changes.
#define SHOW_BOOTSCREEN
#define STRING_SPLASH_LINE1 SHORT_BUILD_VERSION // will be
shown during bootup in line 1
#define STRING_SPLASH_LINE2 WEBSITE_URL // will be shown
during bootup in line 2
#define SERIAL_PORT 0
#define BAUDRATE 250000
#define MOTHERBOARD
#define MOTHERBOARD BOARD_RAMPS_14_EFB
#endif
#define EXTRUDERS 1
#if ENABLED(SWITCHING_EXTRUDER)
#define SWITCHING_EXTRUDER_SERVO_NR 0
#define SWITCHING_EXTRUDER_SERVO_ANGLES { 0, 90 } // Angles for
E0, E1
#endif
#if ENABLED(MIXING_EXTRUDER)
#define MIXING_STEPPERS 2 // Number of steppers in your mixing
extruder
#define MIXING_VIRTUAL_TOOLS 16 // Use the Virtual Tool method with
M163 and M164
#endif
#define POWER_SUPPLY 1
#define TEMP_SENSOR_0 5
#define TEMP_SENSOR_1 0
#define TEMP_SENSOR_2 0
#define TEMP_SENSOR_3 0
#define TEMP_SENSOR_BED 1
```

```

#define MAX_REDUNDANT_TEMP_SENSOR_DIFF 10
#define TEMP_RESIDENCY_TIME 10 // (seconds)
#define TEMP_HYSTERESIS 3 // (degC) range of +/- temperatures
considered "close" to the target one
#define TEMP_WINDOW 1 // (degC) Window around target to start the
residency timer x degC early.
#define TEMP_BED_RESIDENCY_TIME 10 // (seconds)
#define TEMP_BED_HYSTERESIS 3 // (degC) range of +/- temperatures
considered "close" to the target one
#define TEMP_BED_WINDOW 1 // (degC) Window around target to
start the residency timer x degC early.
#define HEATER_0_MINTEMP 5
#define HEATER_1_MINTEMP 5
#define HEATER_2_MINTEMP 5
#define HEATER_3_MINTEMP 5
#define BED_MINTEMP 5
#define HEATER_0_MAXTEMP 275
#define HEATER_1_MAXTEMP 275
#define HEATER_2_MAXTEMP 275
#define HEATER_3_MAXTEMP 275
#define BED_MAXTEMP 150
#define PIDTEMP
#define BANG_MAX 255 // limits current to nozzle while in bang-bang mode;
255=full current
#define PID_MAX BANG_MAX // limits current to nozzle while PID is active
(see PID_FUNCTIONAL_RANGE below); 255=full current
#if ENABLED(PIDTEMP)
#define PID_FUNCTIONAL_RANGE 10 // If the temperature difference
between the target temperature and the actual temperature
#define PID_INTEGRAL_DRIVE_MAX PID_MAX
#define K1 0.95 //smoothing factor within the PID
#define DEFAULT_Kp 13.00
#define DEFAULT_Ki 0.64
#define DEFAULT_Kd 66.15
#endif // PIDTEMP
#define PIDTEMPBED
#define MAX_BED_POWER 255 // limits duty cycle to bed; 255=full current
#if ENABLED(PIDTEMPBED)
#define PID_BED_INTEGRAL_DRIVE_MAX MAX_BED_POWER //limit

```



for the integral term

```
#define DEFAULT_bedKp 158.36
#define DEFAULT_bedKi 30.98
#define DEFAULT_bedKd 202.38
#endif // PIDTEMPBED
#define PREVENT_DANGEROUS_EXTRUDE
#define PREVENT_LENGTHY_EXTRUDE
#define EXTRUDE_MINTEMP 170
#define EXTRUDE_MAXLENGTH (X_MAX_LENGTH+Y_MAX_LENGTH)
```

//prevent extrusion of very large distances

```
#define THERMAL_PROTECTION_HOTENDS // Enable thermal protection
for all extruders
```

```
#define THERMAL_PROTECTION_BED // Enable thermal protection for
the heated bed
```

```
#define USE_XMIN_PLUG
```

```
#define USE_YMIN_PLUG
```

```
#define USE_ZMIN_PLUG
```

```
#define ENDSTOPPULLUPS // Comment this out (using // at the start of the
line) to disable the endstop pullup resistors
```

```
#if DISABLED(ENDSTOPPULLUPS)
```

```
#endif
```

```
#define X_MIN_ENDSTOP_INVERTING true // set to true to invert the logic
of the endstop.
```

```
#define Y_MIN_ENDSTOP_INVERTING true // set to true to invert the logic
of the endstop.
```

```
#define Z_MIN_ENDSTOP_INVERTING true // set to true to invert the logic
of the endstop.
```

```
#define X_MAX_ENDSTOP_INVERTING true // set to true to invert the logic
of the endstop.
```

```
#define Y_MAX_ENDSTOP_INVERTING true // set to true to invert the logic
of the endstop.
```

```
#define Z_MAX_ENDSTOP_INVERTING true // set to true to invert the logic
of the endstop.
```

```
#define Z_MIN_PROBE_ENDSTOP_INVERTING false // set to true to invert
the logic of the endstop.
```

```
#define X_PROBE_OFFSET_FROM_EXTRUDER 10 // X offset: -left +right
[of the nozzle]
```

```
#define Y_PROBE_OFFSET_FROM_EXTRUDER 10 // Y offset: -front
+behind [the nozzle]
```

```

#define Z_PROBE_OFFSET_FROM_EXTRUDER 0    // Z offset: -below
+above [the nozzle]
#define XY_PROBE_SPEED 8000
#define Z_PROBE_SPEED_FAST HOMING_FEEDRATE_Z
#define Z_PROBE_SPEED_SLOW (Z_PROBE_SPEED_FAST / 2)
#define Z_MIN_PROBE_USES_Z_MIN_ENDSTOP_PIN
#define Z_PROBE_DEPLOY_HEIGHT 15 // Raise to make room for the probe
to deploy / stow
#define Z_PROBE_TRAVEL_HEIGHT 5 // Raise between probing points.
#define Z_PROBE_OFFSET_RANGE_MIN -20
#define Z_PROBE_OFFSET_RANGE_MAX 20
#define X_ENABLE_ON 0
#define Y_ENABLE_ON 0
#define Z_ENABLE_ON 0
#define E_ENABLE_ON 0 // For all extruders
#define DISABLE_X false
#define DISABLE_Y false
#define DISABLE_Z false
#define DISABLE_E false // For all extruders
#define DISABLE_INACTIVE_EXTRUDER true //disable only inactive
extruders and keep active extruder enabled
#define INVERT_X_DIR false
#define INVERT_Y_DIR true
#define INVERT_Z_DIR false
#define INVERT_E0_DIR false
#define INVERT_E1_DIR false
#define INVERT_E2_DIR false
#define INVERT_E3_DIR false
#define X_HOME_DIR -1
#define Y_HOME_DIR -1
#define Z_HOME_DIR -1
#define min_software_endstops true // If true, axis won't move to coordinates
less than HOME_POS.
#define max_software_endstops true // If true, axis won't move to coordinates
greater than the defined lengths below.
#define X_MIN_POS 0
#define Y_MIN_POS 0
#define Z_MIN_POS 0
#define X_MAX_POS 165

```

```

#define Y_MAX_POS 165
#define Z_MAX_POS 165
#if ENABLED(FILAMENT_RUNOUT_SENSOR)
  const bool FIL_RUNOUT_INVERTING = false; // set to true to invert the logic
of the sensor.
  #define ENDSTOPPULLUP_FIL_RUNOUT // Uncomment to use internal
pullup for filament runout pins if the sensor is defined.
  #define FILAMENT_RUNOUT_SCRIPT "M600"
#endif
#if ENABLED(MESH_BED_LEVELING)
  #define MESH_INSET 10 // Mesh inset margin on print area
  #define MESH_NUM_X_POINTS 3 // Don't use more than 7 points per axis,
implementation limited.
  #define MESH_NUM_Y_POINTS 3
  #define MESH_HOME_SEARCH_Z 4 // Z after Home, bed somewhere below
but above 0.0.
  #if ENABLED(MANUAL_BED_LEVELING)
    #define MBL_Z_STEP 0.025 // Step size while manually probing Z axis.
  #endif // MANUAL_BED_LEVELING
  #endif // MESH_BED_LEVELING
  #if ENABLED(AUTO_BED_LEVELING_FEATURE)
    #define AUTO_BED_LEVELING_GRID
    #if ENABLED(AUTO_BED_LEVELING_GRID)
      #define LEFT_PROBE_BED_POSITION 15
      #define RIGHT_PROBE_BED_POSITION 170
      #define FRONT_PROBE_BED_POSITION 20
      #define BACK_PROBE_BED_POSITION 170
      #define MIN_PROBE_EDGE 10 // The Z probe minimum square sides can be
no smaller than this.
      #define AUTO_BED_LEVELING_GRID_POINTS 2
      #else // !AUTO_BED_LEVELING_GRID
        #define ABL_PROBE_PT_1_X 15
        #define ABL_PROBE_PT_1_Y 180
        #define ABL_PROBE_PT_2_X 15
        #define ABL_PROBE_PT_2_Y 20
        #define ABL_PROBE_PT_3_X 170
        #define ABL_PROBE_PT_3_Y 20
      #endif // !AUTO_BED_LEVELING_GRID
    #endif // AUTO_BED_LEVELING_FEATURE

```

```

    #if ENABLED(Z_SAFE_HOMING)
    #define Z_SAFE_HOMING_X_POINT ((X_MIN_POS + X_MAX_POS) / 2)
// X point for Z homing when homing all axis (G28).
    #define Z_SAFE_HOMING_Y_POINT ((Y_MIN_POS + Y_MAX_POS) / 2)
// Y point for Z homing when homing all axis (G28).
    #endif
    #define HOMING_FEEDRATE_XY (50*60)
    #define HOMING_FEEDRATE_Z (4*60)
    #define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {160,160,6400,500} // default
steps per unit for Ultimaker
    #define DEFAULT_MAX_FEEDRATE {180, 180, 3, 25} // (mm/sec)
    #define DEFAULT_MAX_ACCELERATION {1000,1000,100,10000} //
X, Y, Z, E maximum start speed for accelerated moves. E default values are good for
Skeinforge 40+, for older versions raise them a lot.
    #define DEFAULT_ACCELERATION 1500 // X, Y, Z and E
acceleration in mm/s^2 for printing moves
    #define DEFAULT_RETRACT_ACCELERATION 1500 // E acceleration in
mm/s^2 for retracts
    #define DEFAULT_TRAVEL_ACCELERATION 1500 // X, Y, Z
acceleration in mm/s^2 for travel (non printing) moves
    #define DEFAULT_XYJERK 20.0 // (mm/sec)
    #define DEFAULT_ZJERK 0.4 // (mm/sec)
    #define DEFAULT_EJERK 5.0 // (mm/sec)
    #if ENABLED(EEPROM_SETTINGS)
    #define EEPROM_CHITCHAT // Please keep turned on if you can.
    #endif
    #define HOST_KEEPLIVE_FEATURE // Disable this if your host doesn't
like keepalive messages
    #define DEFAULT_KEEPLIVE_INTERVAL 2 // Number of seconds
between "busy" messages. Set with M113.
    #define PREHEAT_1_TEMP_HOTEND 180
    #define PREHEAT_1_TEMP_BED 70
    #define PREHEAT_1_FAN_SPEED 0 // Value from 0 to 255
    #define PREHEAT_2_TEMP_HOTEND 240
    #define PREHEAT_2_TEMP_BED 110
    #define PREHEAT_2_FAN_SPEED 0 // Value from 0 to 255
    #if ENABLED(NOZZLE_PARK_FEATURE)
    #define NOZZLE_PARK_POINT { (X_MIN_POS + 10), (Y_MAX_POS - 10),
20 }

```

```

#endif
#if ENABLED(NOZZLE_CLEAN_FEATURE)
#define NOZZLE_CLEAN_STROKES 12
#define NOZZLE_CLEAN_START_POINT { 30, 30, (Z_MIN_POS + 1)}
#define NOZZLE_CLEAN_END_POINT {100, 60, (Z_MIN_POS + 1)}
#define NOZZLE_CLEAN_GOBACK
#endif
#define PRINTJOB_TIMER_AUTOSTART
#define LCD_LANGUAGE en
#define DISPLAY_CHARSET_HD44780 JAPANESE
#define ULTRA_LCD // Character based
#define SDSUPPORT
#define ULTIMAKERCONTROLLER
#define ULTIPANEL
#define REPRAP_DISCOUNT_SMART_CONTROLLER
#if ENABLED(SAV_3DGLCD)
#define U8GLIB_SH1106
#endif
#define SOFT_PWM_SCALE 0
#define SERVO_DELAY 300
#define DEFAULT_NOMINAL_FILAMENT_DIA 3.00 //Enter the diameter
(in mm) of the filament generally used (3.0 mm or 1.75 mm) - this is then used in the
slicer software. Used for sensor reading validation
#if ENABLED(FILAMENT_WIDTH_SENSOR)
#define FILAMENT_SENSOR_EXTRUDER_NUM 0 //The number of the
extruder that has the filament sensor (0,1,2)
#define MEASUREMENT_DELAY_CM 14 //measurement delay in cm.
This is the distance from filament sensor to middle of barrel
#define MEASURED_UPPER_LIMIT 3.30 //upper limit factor used for
sensor reading validation in mm
#define MEASURED_LOWER_LIMIT 1.90 //lower limit factor for sensor
reading validation in mm
#define MAX_MEASUREMENT_DELAY 20 //delay buffer size in bytes
(1 byte = 1cm)- limits maximum measurement delay allowable (must be larger than
MEASUREMENT_DELAY_CM and lower number saves RAM)
#define DEFAULT_MEASURED_FILAMENT_DIA
DEFAULT_NOMINAL_FILAMENT_DIA //set measured to nominal initially
#endif
#endif // CONFIGURATION_H

```